

**UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS**

**FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS**

**E.A.P. DE INGENIERÍA MECÁNICA DE FLUIDOS**

**Simulación numérica de la modificación de las olas en  
la Bahía de Miraflores**

**TESIS**

Para optar el Título Profesional de Ingeniero Mecánico de Fluidos

**AUTOR**

Carmela Cristhy Ramos Orlandino

**ASESOR**

Jorge Otiniano Rodríguez

Lima - Perú

2014

## DEDICATORIA

A Dios por guiar siempre mi camino, a mis padres Víctor y Carmela, por su apoyo, consejo, amor y comprensión, por enseñarme los valores y principios que hacen de mí la persona que soy. A mis hermanas, mi hermano y sobrinos por estar siempre a mi lado cuando los he necesitado y por sobre todo a mi hija Astrid Fernández, por alegrar con su gran amor cada día de mi vida.

## **AGRADECIMIENTOS**

La presente tesis no hubiera sido posible sin la participación de personas e instituciones que han influenciado directa o indirectamente en mi formación académica.

- A mi familia por comprender que las amanecidas estudiando fueron necesarias para cumplir mis objetivos futuros.
- A Alex Fernández por comprender mi labor como pareja, madre, estudiante y profesional.
- A mi amigo Emanuel Guzmán por su amistad de más de 10 años, apoyo, consejo y por sobre todo enseñanza de las técnicas de modelamiento numérico, gracias amigo por enseñarme también a ser perseverante.
- A la Dirección de Hidrografía y Navegación por darme la oportunidad de iniciar los trabajos en el área de Modelamiento Numérico.
- A los profesores de la Escuela de Ingeniería Mecánica de Fluidos por darme la base para mi desarrollo profesional.
- Al Ing. Jorge Otiniano, por su paciencia, consejos y por aceptar ser mi asesor.
- Al profesor Zuta Rubio por enseñarme a querer este mundo de la oceanografía.
- Al Ing. Américo Rosas, Ing. Douglas Sarango y al Ing. Vega Bueza por su interés y aportes mediante sus observaciones.

Gracias a todos por su participación en mi vida, ya que cada quien a su manera ayudaron a enriquecer mi tesis.

# SIMULACION NUMERICA DE LA MODIFICACION DE LAS OLAS EN LA BAHIA DE MIRAFLORES

## INDICE

### CAPITULO I

I.	INTRODUCCIÓN .....	1
1.1.	Generalidades.....	1
1.2.	Problemática .....	2

### CAPITULO II

II.	OBJETIVOS .....	4
2.1.	Objetivo General .....	4
2.2.	Objetivos específicos .....	4

### CAPITULO III

III.	DESCRIPCIÓN DEL AREA DE ESTUDIO.....	5
3.1	Ubicación de la bahía de Miraflores .....	5
3.2	Antecedentes .....	5

### CAPITULO IV

IV.	FUNDAMENTO TEORICO .....	10
4.1	Elementos básicos de una ola .....	10
4.2.	Clasificación de las olas.....	12
4.2.1.	Por su origen o energía de generación .....	12
4.2.2.	Por la profundidad en que se encuentran .....	13
4.2.3.	Por el Periodo .....	14
4.2.4.	Por la longitud .....	15
4.3.	Procesos de propagación del oleaje hacia la costa .....	17
4.4	Hipótesis básicas del movimiento de las olas .....	18
4.4.1.	Celeridad y longitud de la ola .....	19
4.4.2.	Celeridad de grupo.....	19
4.5.	Transformación del oleaje en las proximidades de las costas .....	22
4.5.1.	Refracción de las olas .....	22



4.5.2. Difracción .....	24
4.5.3. Reflexión de las olas .....	25
4.5.4. Rotura del oleaje .....	26
4.5.5. Tipo de ola rompiente .....	28
4.6. Teoría de olas .....	29
4.6.1. Teoría de olas lineal .....	29
4.6.2. Teoría de olas no lineal .....	30
4.6.3. Modelos Numéricos de Olas .....	32
4.6.3.1. ¿Que son modelos numéricos? .....	32
4.6.3.2. Ecuaciones gobernantes en modelos numéricos .....	32
4.6.4. Tipos de Modelos de Olas.....	33
4.6.4.1. Por fase.....	33
4.6.4.2. Por formulación .....	34
4.6.4.3. Por su aproximación .....	35
4.6.4.4. Esquema Numérico.....	37

## CAPITULO V

V. DATOS EMPLEADOS.....	40
5.1. Batimetría y perfil costero .....	40
5.2. Clima de olas .....	43

## CAPITULO VI

VI. MODELACION NUMERICA .....	53
6.1. Modelo empleado .....	53
6.2. Grilla Usada en el Modelo.....	55
6.3. Características del modelo REFDIF.....	56
6.3.1. Ecuación de pendiente suave .....	56
6.3.2. Modelo de difracción .....	57
6.3.3. Consideraciones .....	57
6.3.4. Disipación de Energía .....	59
6.3.5. Desarrollo Numérico .....	60
6.3.6. Datos necesarios para inicializar el modelo de olas REFDIF .....	61
6.3.7. Datos de salida del modelo de olas REFDIF.....	62
6.3.8. Ventajas y desventajas .....	62

6.4. Aplicación del modelo REFDIF a casos de teóricos .....	63
6.4.1. Casos Teóricos .....	63
6.4.1.1. Diseño de una batimetría plana y de pendiente suave.....	63
6.4.1.2. Diseño de una batimetría plana con pendiente suave y un rompeolas .....	63
6.4.1.3. Diseño de una batimetría plana de pendiente suave con tres rompeolas .....	64
6.4.1.4. Diseño con una batimetría con 2 lomas submarinas.....	65
6.4.1.5. Diseño con una batimetría con 1 depresión cercana a costa.....	65
6.4.2. Condición de frontera .....	66
6.5. Modelación de propagación de olas en la Bahía de Miraflores .....	67
6.5.1 Validez de la teoría de olas (REFDIF) para la bahía de Miraflores .....	67
6.5.2. Grilla de Cálculo.....	68

## CAPITULO VII

VII. RESULTADOS .....	74
7.1. Modelación a casos teóricos.....	74
7.2. Modelación de las olas en la bahía de Miraflores .....	80
7.4. Validación .....	90

## CAPITULO VIII

VIII. CONCLUSIONES Y RECOMENDACION .....	95
8.1. Conclusiones .....	95
8.2. Recomendación .....	96

## CAPITULO IX

IX. BIBLIOGRAFIA.....	98
-----------------------	----

## CAPITULO X

X. ANEXO.....	100
---------------	-----

## LISTA DE FIGURAS

### CAPITULO III

Figura 3.1. Área de estudio .....	5
Figura 3.2. Cronología de años de la Costa Verde (a) Años 1900 – 1940, (b) Años 1950-1970 y (c) Año 2013.....	7
Figura 3.3. Estructuras existentes en la bahía de Miraflores.....	8
Figura 3.4. Obras planteadas en la Bahía de Miraflores. Plan Maestro de la Costa 1994. ....	9

### CAPITULO IV

Figura 4.1. Características de una ola.....	12
Figura 4.2. Tipos de olas en el mar.....	14
Figura 4.3. Representación esquemática de los tipos de olas que existen en la superficie del océano y de la energía contenida en ella.....	16
Figura 4.4. Acción de un viento constante sobre una zona determinada del mar .....	18
Figura 4.5. Ilustración del desarrollo del oleaje (Komar, 1973) .....	18
Figura 4.6. Representación de la celeridad de grupo.....	20
Figura 4.7. Velocidad de grupo .....	21
Figura 4.8. Refracción de un tren de olas .....	22
Figura 4.9. Propagación del tren de olas.....	24
Figura 4.10. Difracción de olas en estructuras marinas .....	25
Figura 4.11. Reflexión de olas.....	25
Figura 4.12. Caracterización rotura tipo spilling (a)Gráfica (b) Real.....	27
Figura 4.13. Caracterización rotura tipo plunging (a)Gráfica (b) Real .....	27
Figura 4.14. Caracterización rotura tipo Surfing.....	28
Figura 4. 15. Regiones de validez de la teoría de olas.....	31
Figura 4.16. Perfiles de olas de acuerdo a las diferentes teorías.....	32
Figura 4.17. Evolución de la superficie de una ola estacionaria en el espacio en diferentes instantes de tiempo .....	35
Figura 4.18. Evolución de la superficie de una ola cuasi- estacionaria para diferentes valores de $\omega t$ y su envolvente.....	35
Figura 4.19. Esquema numérico .....	37
Figura 4.20. Esquema numérico – volúmenes finitos.....	39

### CAPITULO V

Figura 5.1. Carta batimétrica N° 223 Bahía Ancón a Isla Pachacamac.....	40
Figura 5.2. Carta batimétrica N° 2236 Isla San Lorenzo a Ensenada Chorrillos. ....	41
Figura 5.3. Batimetría utilizada para la modelación.....	42
Figura 5.4. Ubicación de la boya NOAA 32012 .....	43
Figura 5.5. Comparación de la rosa de dirección de olas del modelo WAVE WATCH y los datos de la boya NOAA para el punto 19.5S - 85.5W.....	45
Figura 5.6. Comparación del histograma de altura de olas del modelo WAVE WATCH y los datos de la boya NOAA para el punto 19.5S - 85.5W .....	46
Figura 5.7. Comparación del periodo de olas del modelo WAVE WATCH y los datos de la boya NOAA para el punto 19.5S - 85.5W .....	47
Figura 5.8. Ubicación del punto de extracción de olas en aguas profundas.....	48

Figura 5.9. Serie de tiempo de altura, dirección y periodo de olas en aguas profundas para el punto 80 W y 13.5 S, estimados según el modelo de olas oceánicas WW3. ....	49
Figura 5.10. Distribución de frecuencia de altura y periodo de olas en aguas profundas para el punto 80 W y 13.5 S, de acuerdo con los resultados del modelo de olas oceánicas WW3. Fuente de datos: NCEP-NOAA. ....	50

## CAPITULO VI

Figura 6.1. Estructura del modelo numérico REFDIF. ....	54
Figura 6.2. Subrutinas del Modelo numérico REFDIF. ....	54
Figura 6.3. Grillado usado por el modelo REFDIF. ....	55
Figura 6.4. Subgrilla usada en el modelo REFDIF. ....	56
Figura 6.5. Rango de validez de las diferentes teorías de oleaje. ....	58
Figura 6.6. Batimetría plana con pendiente suave. ....	63
Figura 6.7. Batimetría plana con pendiente suave y un rompeolas. ....	64
Figura 6.8. Batimetría plana con pendiente suave y 3 rompeolas. ....	64
Figura 6.9. Batimetría con 2 lomas submarinas. ....	65
Figura 6.10. Batimetría con 1 depresión cercana a costas. ....	66
Figura 6.11. Condición de frontera para la modelación. ....	66
Figura 6.12. Sección batimétrica para el cálculo de pendiente. ....	67
Figura 6.13. Diagrama de tipos de olas. ....	68
Figura 6.14. Sistema de referencia y grilla de cálculo para las olas que se aproximan desde el Oeste. ....	70
Figura 6.15. Sistema de referencia y grilla de cálculo para las olas que se aproximan desde el Suroeste. ....	71
Figura 6.16. Sistema de referencia y grilla de cálculo para las olas que se aproximan desde el Sur. ....	72

## LISTA DE TABLAS

### CAPITULO IV

Tabla 4.1. Clasificación de los tipos de olas. ....	13
Tabla 4.2. Tipos de rompiente - Irribarren. ....	29

### CAPITULO V

Tabla 5.1. Estimación de olas (80 W y 13.5 S) de acuerdo con los resultados reanálisis del modelo numérico WW3. ....	51
Tabla 5.2.-Casos de propagación de olas de aguas profundas a poco profundas en 80 Oeste y 13.5 Sur. ....	52

### CAPITULO VI

Tarea 6.1. Características de la grilla de cálculo empleadas en la modelación. ....	69
Tarea 6.2. Casos de aproximación de olas estudiadas en la presente la tesis. ....	73

### CAPITULO VII

Tabla 7.1. Detalle de la transformación del oleaje en el punto de control P01, P02, P03 y P04. ....	89
Tabla 7.2.- Estaciones de medición de olas. ....	90
Tabla 7.3. Estaciones utilizadas para la validación. ....	91

## GLOSARIO DE TERMINOS

**Altura de ola significativa:** Es la altura de ola promedio del tercio de las alturas de las olas más grandes de un tren de olas.

**Amplitud de ola:** Distancia que una partícula se aleja de su posición media en una dirección perpendicular a la de la propagación. La amplitud es equivalente a la mitad de la altura de la ola.

**Celeridad de la ola:** Velocidad con la que se desplaza la ola.

**Clima de olas:** Es el régimen medio del oleaje que se realiza un estudio estadístico considerando la ocurrencia de un evento determinado que representa un rango o intervalo de periodos, altura y dirección

**Coeficiente de reflexión:** Coeficiente que se obtiene de relacionar la altura de ola reflejada con la altura de ola incidente.

**Difracción:** Fenómeno que se produce cuando las olas inciden sobre la barrera natural o artificial que impiden parcialmente su paso a la zona posterior del mismo, ocasionando una transferencia de energía lateral de una zona a otra.

**Fetch:** Se emplea para definir la distancia que recorre el viento a lo largo de la superficie del mar generando olas

**Espigón:** estructura que se construye generalmente en forma perpendicular a la línea de costa, nos ayuda a proteger las playas equilibrándola a conveniencia, lo cual nos sirve para atrapar el transporte litoral o retardar su acción sobre la costa.

**Fondo fijo:** Zona de desplante del rompeolas, la cual es impermeable sin movimiento en el modelo.

**Longitud de la ola:** Distancia horizontal que se tiene entre dos crestas o dos valles sucesivos.

**Ola:** es una onda que se describe en la superficie del agua en movimiento.

**Oleaje de tormenta:** Es aquel que se produce debido a los fuertes vientos que genera una tormenta tropical con velocidades superiores a los 50km/hr.

**Oleaje irregular o extremos:** Sistema de olas compuesto por una combinación de olas simples de distinto periodo, altura, dirección, etc.

**Ológrafo:** Equipo electrónico que registra y amplifica las señales que se encargan de enviar los sensores de oleaje.

**Periodo de la ola:** Es el intervalo de tiempo en segundos que tardan en pasar dos crestas o dos valles de una ola por un mismo punto.

**Reflexión:** se presenta cuando la energía que posee el oleaje se disipa total o parcialmente hacia el mar cuando esta es interceptada por una estructura artificial o un obstáculo natural.

**Refracción:** Fenómeno que se presenta cuando el oleaje se aproxima a la costa, ocasionando que los frentes de ola se desplacen a diferentes velocidades, esto depende de la profundidad, provocando que la cresta se deforme en su proyección horizontal.

**Rompeolas:** Estructura artificial que puede ser construida de distintos tipos de materiales, ya sea de enrocamiento o de elementos artificiales prefabricados. Su función principal es generar una zona de abrigo o calma al interior del recinto portuario.

**Rompeolas superficial:** Es la estructura de protección costera, cuyo nivel de coronamiento se encuentra por encima del nivel medio del mar.

**Rompiente:** Se presenta cuando una ola alcanza un estado crítico y puede ser motivada por la relación de esbeltez, por el efecto de fondo, la transferencia de energía del viento sobre la superficie libre del agua o por la forma de la estructura sobre la cual rompe.

**Sotavento:** El término se emplea en un contexto marítimo para designar al sector opuesto a donde sopla el viento en relación a un cierto punto.

**Veriles:** Son líneas de igual profundidad (isobáticas) para llevar la derrota de un buque

# **SIMULACIÓN NUMÉRICA DE LA MODIFICACIÓN DE LAS OLAS EN LA BAHÍA DE MIRAFLORES**

## **CAPITULO I**

### **I. INTRODUCCIÓN**

#### **1.1. Generalidades**

El oleaje que arriba a la costa peruana, es generado principalmente por vientos que se originan a cientos de kilómetros, en océano abierto al sur de la costa sudamericana, y que al aproximarse a la zona costera se modifican por efecto de diversos factores, siendo el de mayor importancia la orientación de la costa, el gradiente batimétrico, la geomorfología costera y las estructuras marinas (espigones, rompeolas, entre otros), los que generan los fenómenos de refracción y difracción, permitiendo un proceso de transformación de la ola al arribar a costa, modificando de esta manera la altura y dirección de las olas.

El análisis práctico de la refracción de las olas, se ha llevado a cabo en el pasado utilizando técnicas de trazado de rayos ortogonales, lo cual no incluía la difracción de las olas. A menudo, debido a la complejidad de la batimetría, el especialista debía hacer ciertas consideraciones en los contornos batimétricos que permita una adecuada ubicación de las intercepciones de la batimetría, lo que conduce a dificultades en la interpretación. Con el desarrollo de la tecnología en hardware y software se han acelerado los diversos procesos computacionales que requiere y exige un modelo numérico, estructurado matemáticamente con técnicas y esquemas de grillado y espaciamiento espacio-temporal de acuerdo con los procesos de refracción y difracción. De esta manera, se puede conocer y entender la refracción y difracción de las olas en la bahía de Miraflores, lo que nos permite obtener uno de los principales procesos costeros y marítimos como la caracterización de las olas.

La bahía de Miraflores al encontrarse ubicada en la zona central del departamento de Lima, capital del Perú, congrega a miles de turistas, deportistas e inversionistas, que ven a la bahía de Miraflores como un lugar de potencial desarrollo turístico y económico. Ante esto, en el año 1994, el Instituto Metropolitano de Planificación elaboró el “Plan Maestro de la Costa Verde”, en la que se considera la posible distribución del área acuática de la bahía de Miraflores, considerándose para esto la posible construcción de diversas estructuras marinas a lo largo de la bahía, lo que involucra realizar estudios que permitan conocer la dinámica marina de olas, corrientes y transporte de sedimentos, siendo la base de estos estudios el conocimiento de las olas.

En la actualidad, existe limitada información consistente y confiable de la propagación de olas en la bahía de Miraflores, ya que a través de los años muchos autores han tratado el tema de la refracción y difracción de las olas mediante técnicas que permitan visualizar y representar dichos fenómenos, entre ellos los medidos con ológrafos, lo que involucra un gran costo de instalación, motivo por el cual existe solo información de medición de olas de solo horas o días, por otro lado, existen los cálculos realizados en base al diseño de diagramas de refracción y difracción (que es la propagación de una ola basada en la ley de Snell) y que en la actualidad es la técnica más usada, pero no muy precisa.

Teniendo en cuenta lo anterior, se plantea la caracterización de la dinámica de olas en la bahía de Miraflores mediante aplicación de técnicas de modelación numérica que simule la transformación del oleaje debido a la orientación de los veriles batimétricos con respecto a la incidencia de las olas (refracción) y al gradiente batimétrico, estableciéndose un clima de olas en varios puntos estratégicos de la bahía, que puedan ser usados como condiciones base para futuros estudios de detalle que involucren la construcción de estructuras marinas.

La simulación de la transformación del oleaje será realizado mediante la adaptación del modelo numérico de olas REFDFI a la bahía de Miraflores, el cual nos permitirá obtener las distribuciones espaciales de la dirección y altura del oleaje, determinando los coeficientes de refracción y de poca profundidad de las olas en la bahía de Miraflores, con la finalidad de conocer más a detalle las características de las olas que llegan a zona costera y además que pueda ser útil parcial o totalmente a los proyectos portuarios que se realicen en la bahía.

## **1.2. Problemática**

A pesar que el oleaje es un parámetro importante para la caracterización dinámica de una zona de estudio, que permita realizar el debido planeamiento de desarrollo de una zona costera, frente a las costas del Perú, se carece de información medida por un periodo de tiempo prolongado. La mayoría de estudios está enfocado a mediciones de olas por periodos de tiempos muy cortos en el orden de días de medición, que si bien es cierto representan las condiciones de oleaje de esa época del año específica, no representa las condiciones climáticas (regímenes medios y extrémos) del oleaje esto se suma que en décadas anteriores los equipos de medición de oleaje (ológrafo) solo registraban datos alturas y periodos de oleaje, lo que restringía el análisis de olas a estos dos parámetros.

A comienzo de los años sesenta, el método basado en la teoría del rayo era el más extendido entre los ingenieros de costas y portuarios al momento de determinar las características del oleaje necesarias en la



zona de estudio (Liu & Losada). Este método de rayos utilizado se desarrolla en base a los principales contornos batimétricos suavizado y a lo largo del rayo a proyectarse, con pasos no necesariamente muy pequeños en comparación a la longitud de ola característica (Liu & Losada). Así mismo, dado que la teoría del rayo no permite el flujo de energía a través del rayo, pierde su validez cerca de las lomas submarinas, donde se produce la intersección entre los rayos y los efectos de difracción se hacen importantes. Ante esta problemática planteada, en la actualidad los métodos computacionales permiten al ingeniero, el uso de modelos numéricos que permiten caracterizar el patrón de oleaje ya sea que exista o no la interacción no lineal producto de la intersección de dos rayos, así mismo, este método determina el clima de olas cercana a la zona del proyecto, el cual será la base para un adecuado diseño de estructuras portuarias.

## CAPITULO II

### II. OBJETIVOS

Los objetivos del desarrollo de la Tesis propuesta son:

#### 2.1. Objetivo General

- Caracterización de la dinámica de olas en la bahía de Miraflores mediante aplicación de técnicas de modelación numérica que permita establecer las condiciones base para futuros estudios que involucren la construcción de estructuras marinas.

#### 2.2. Objetivos específicos

- Calcular las distribuciones espaciales de la dirección y altura de olas, con la finalidad de reforzar los conocimientos de la dinámica marina en la bahía de estudio.
- Obtener información de los coeficientes de refracción de olas en la bahía de Miraflores, con la finalidad de conocer y verificar con el método convencional de diagramas de refracción de la simulación realizada.
- Determinar diversos escenarios que permitan validar el fenómeno de refracción y difracción en el modelo numérico, tales como:
  - Refracción en una batimetría plana y de pendiente suave
  - Refracción y difracción en una batimetría plana con pendiente suave y un rompeolas
  - Refracción y difracción en una batimetría plana de pendiente suave con tres rompeolas
  - Refracción en una batimetría con 2 lomas submarinas
  - Refracción con una batimetría con 1 depresión cercana a costa
- Incrementar la información que permita mejorar la comprensión de los procesos físicos costeros con miras al desarrollo sostenible.

## CAPITULO III

### III. DESCRIPCIÓN DEL AREA DE ESTUDIO

#### 3.1 Ubicación de la bahía de Miraflores

La Bahía de Miraflores se ubica en la costa central del Perú, sector oriental del océano Pacífico, entre latitudes 12°03'57.6"Sur y 12°12'54.6"Sur, y longitudes 77°00'37.8"Oeste y 77°13'07.8"Oeste. Políticamente comprende la provincia de Lima y Callao, en el departamento de Lima. La bahía de Miraflores se encuentra al Sur de la bahía del Callao, separada por la península de la Punta, abarcando los distritos de San Miguel, Magdalena, San Isidro, Miraflores, Barranco y Chorrillos. Figura 3.1

Figura 3.1. Área de estudio



Fuente Imagen: Google Earth

#### 3.2 Antecedentes

Las playas, planicies y acantilados que tenemos en la actualidad, y que forman el relieve de la bahía de Miraflores, se fueron creando en un largo proceso que duró millones de años, sobre todo durante la era terciaria y cuaternaria, donde intervinieron fenómenos como el movimiento del cauce del Rímac (por lo que en sus suelos encontramos cantos rodados en abundancia) y los levantamientos de la corteza

terrestre (como se aprecia en los acantilados de la Costa Verde). (Le Roux et al, 2000). Así, poco a poco, la geomorfología fue moldeada hasta llegar a ser la que ahora conocemos.




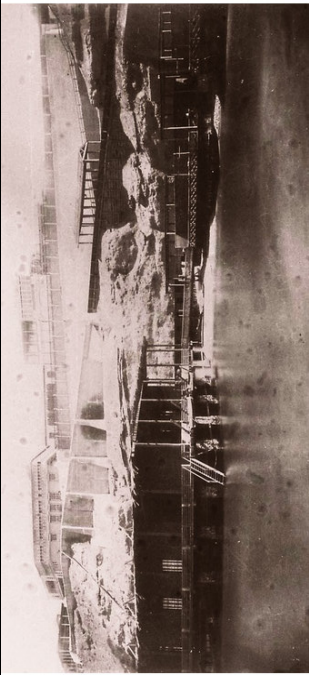

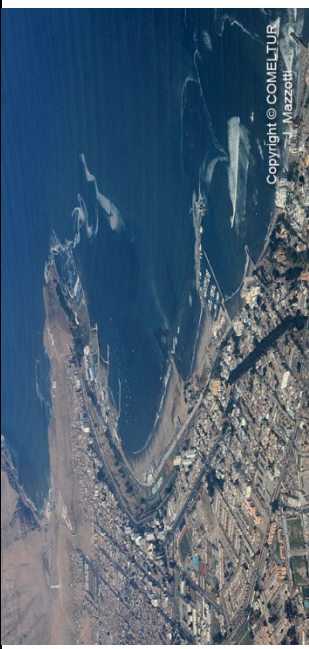






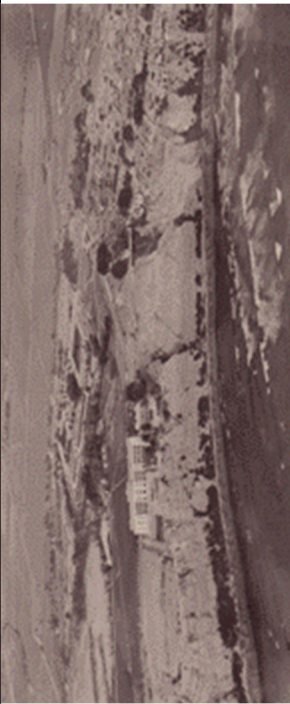


Gran parte de la bahía está conformada por lo que conocemos actualmente como la Costa Verde, actualmente un atractivo recreacional y turístico. Sin embargo, antes de los años 50, no existía la zona “Costa Verde”, recién entre los años 1950 a 1970, se empezaron a construir una serie de espigones de protección de playas en la zona sur de la bahía, los cuales han logrado retener sedimentos provenientes del Sur, formándose las playas de Agua Dulce, las Sombrillas, los Yuyos, Barranco, los Pavos, entre otros. Ver Figura 3.2.

Diferentes estudios han sido realizados en la bahía de Miraflores a través de los años, con la finalidad de comprender su formación, así como para construcción de estructuras ubicadas a lo largo del litoral costero, ubicándose en la actualidad importantes infraestructuras urbanas y playas recreacionales tales como los Delfines, Waikiki, Miraflores, Barranquito, Agua Dulce, entre otros, construyéndose entre estas playas aproximadamente 26 obras marinas entre rompeolas y espigones, que sirven como protección de las zonas aledañas (Figura 3.3).

La bahía de Miraflores es un importante lugar de recreación y turismo, debido que sus playas presentan diversas características en los patrones de comportamiento de las olas en toda la bahía. Es así que podemos encontrar playas con alturas de olas mayores que otras zonas que se encuentran en la misma bahía, lo que permite el desarrollo del “surf” y otras actividades acuáticas, lo que conlleva al planteamiento de construcción de estructuras como método de protección de playas, para lo cual es de suma importancia el conocimiento del patrón de olas dentro de la bahía (Figura 3.4). Ante esto, en el año 1994, el Instituto Metropolitano de Planificación elaboró en 1994 el “Plan Maestro de la Costa Verde”, (Delft Hydraulics, 1996) en la que se considera la posible distribución del área acuática de la bahía de Miraflores, considerándose para esto la posible construcción de diversas estructuras marinas a lo largo de la bahía. Por lo que se requiere conocer principalmente la dinámica marina de olas.



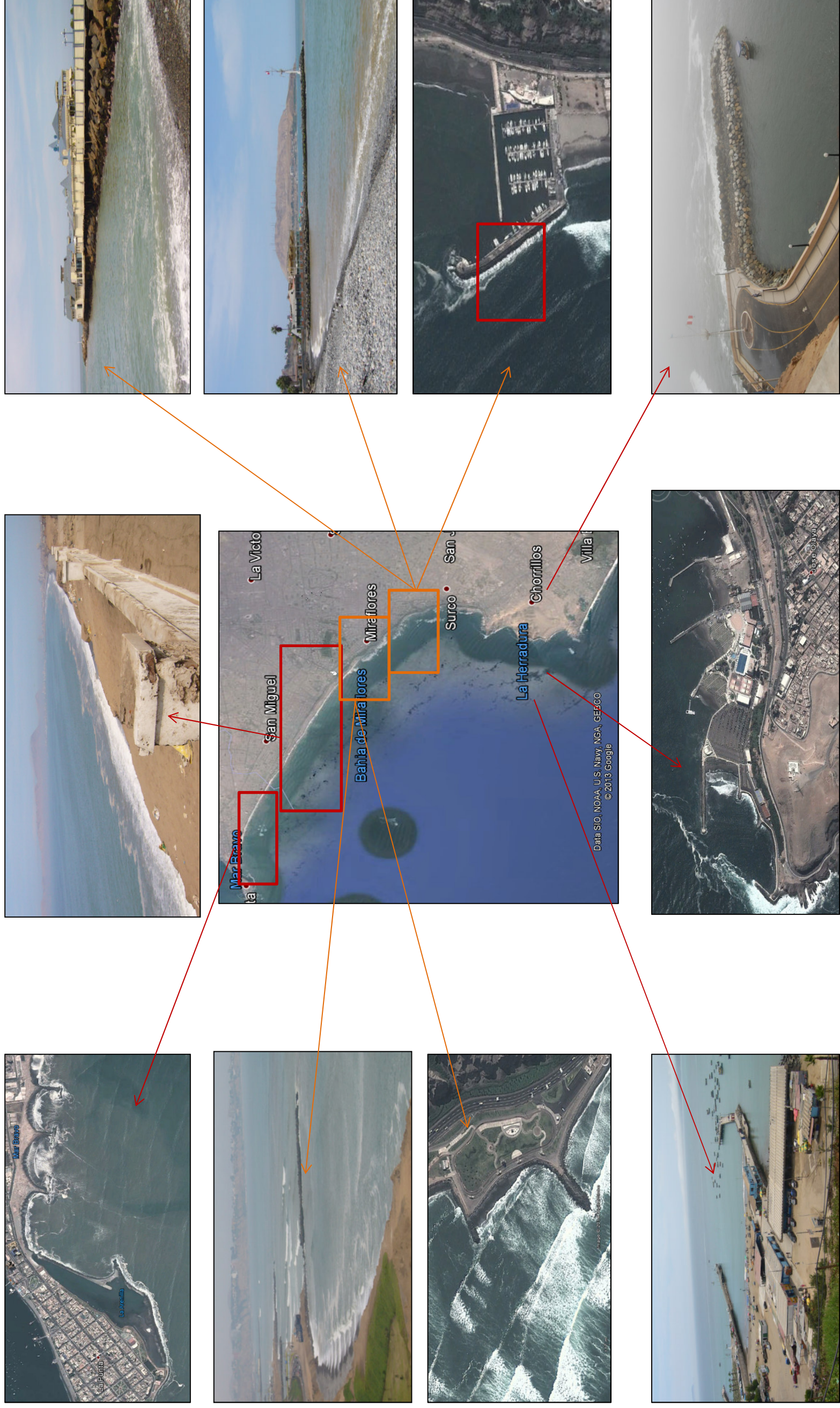
Figura 3.2. Cronología de años de la Costa Verde (a) Años 1900 – 1940, (b) Años 1950-1970 y (c) Año 2013

 <p>Miraflores 1940</p>	 <p>Miraflores 1950-60</p>	 <p>Miraflores 2013</p>
 <p>Baños de Miraflores – Club Waikiki 1900</p>	 <p>Vista de Chorrillos a Miraflores 1950-70</p>	 <p>Vista de Chorrillos a Miraflores 2013</p>
 <p>Club Regatas – Chorrillos 1920</p>	 <p>Club Regatas – Chorrillos 1950-60</p>	 <p>Club Regatas – Chorrillos 2013</p>
 <p>Playa La Herradura 1940</p>	 <p>Playa La Herradura 1960-70</p>	 <p>Playa La Herradura 2013</p>
 <p>Chorrillos - 1940</p>	 <p>Playa Agua Dulce 1950-60</p>	 <p>Playa Agua Dulce 2013</p>

Fuente: Historia: Lalimaquesefue: <http://lalimaquesefue.blogspot.com/2012/02/foto-detalles-playa-y-banos-de-la.html>



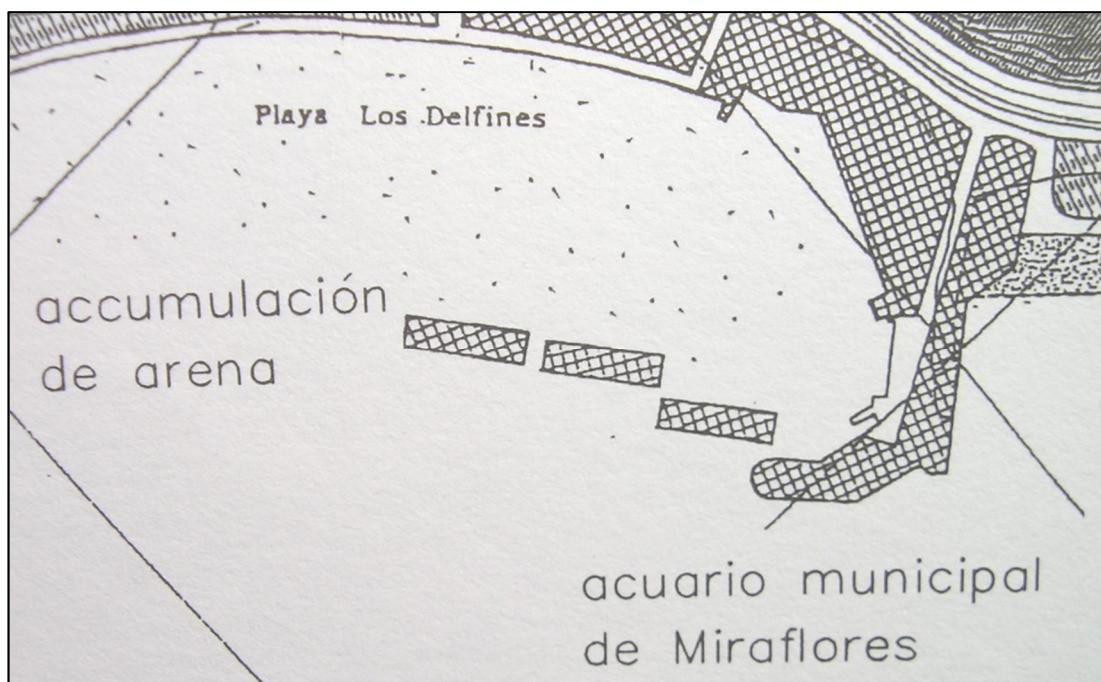
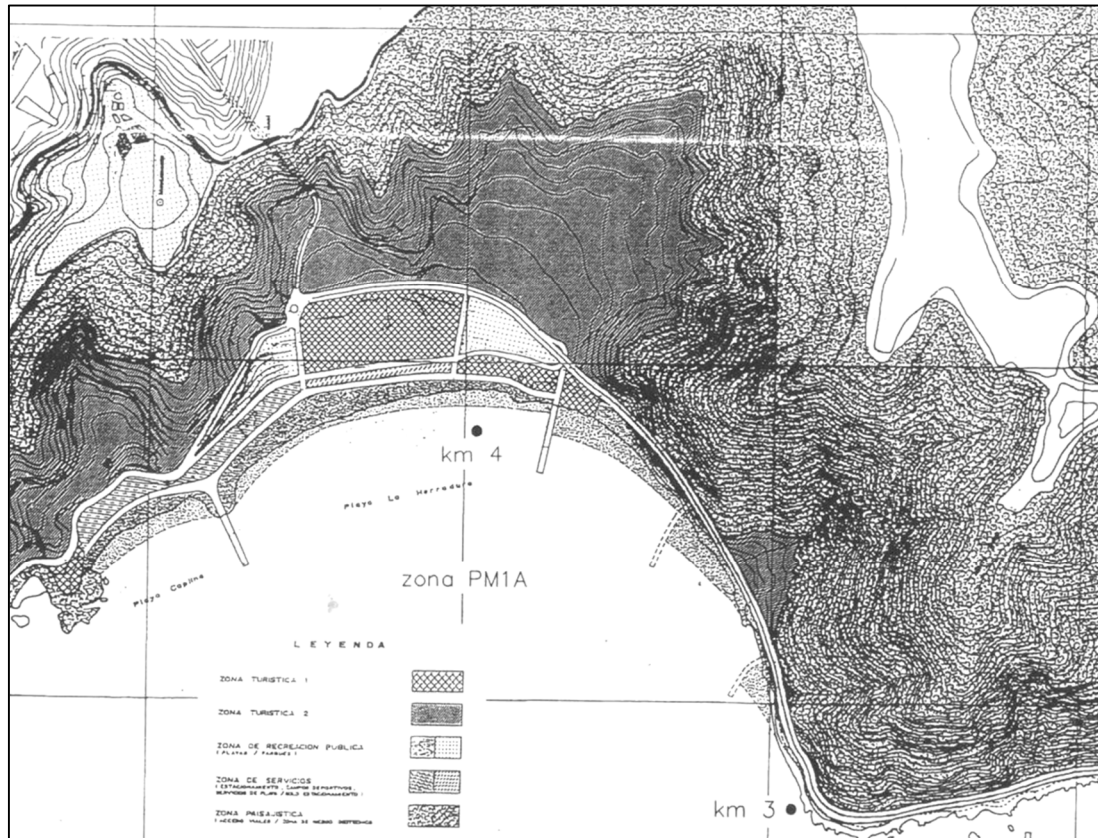
Figura 3.3. Estructuras existentes en la bahía de Miraflores



Fuente: Imagen del Google Earth



Figura 3.4. Obras planteadas en la Bahía de Miraflores. Plan Maestro de la Costa 1994.



Fuente: (Delft Hydraulics, 1996)

## CAPITULO IV

### IV. FUNDAMENTO TEORICO

#### 4.1 Elementos básicos de una ola

Las olas se caracterizan por tener elevaciones, llamadas cresta, que es la convexidad hacia la superficie que se eleva sobre el nivel medio del mar y un valle que es la concavidad bajo el nivel medio del mar o depresiones (Figura 4.1). Los parámetros importantes de una ola se describe a continuación.

Las olas se caracterizan por tener variables que pueden ser medidos directamente en campo (variables independientes) y variables que pueden ser obtenidas de las variables independientes, mediante fórmulas teóricas (variables dependientes).

##### a) Parámetros independientes

- **Altura (H):** Distancia vertical entre una cresta y un valle consecutivos. Las altura de las olas del mar de fondo se clasifican en: (Macdonel et al, 1999)

Baja	0 - 2 mts.
Moderada	2 - 4 mts.
Grande	Más de 4 mts.
- **Período (T):** Tiempo que transcurre entre el paso de dos crestas (o dos valles) consecutivos por un mismo lugar. (Macdonel et al, 1999)
- **Longitud (L):** Distancia entre dos crestas consecutivas, desde los valles o desde las crestas. La longitud de las olas de mar de fondo se clasifican en: (Macdonel et al, 1999)

Corta	0 - 100 mts.
Media	100 - 200 mts.
Larga	Más de 200 mts.
- **Profundidad ( h ):** Es la distancia vertical entre el Nivel Medio del Mar (NMM) y el fondo marino. (Macdonel et al, 1999)



- **Dirección (D):** Es el ángulo de aproximación de la ola con respecto a un sistema de referencia (cartesiano u oceanográfico).

b) Parámetros dependientes

- **Amplitud ( A):** Es la mitad de la altura total de la ola (Macdonel et al, 1999).

$$A = \frac{H}{2} \quad \dots(4. 1)$$

- **Celeridad ( C ):** o velocidad de propagación, que resulta de la longitud entre dos crestas (L) dividido entre el Periodo (T). (Macdonel et al, 1999)

$$C = \frac{L}{T} \quad \dots(4. 2)$$

- **Peralte ( P ):** es la resultante de dividir la Altura entre la longitud de olas.

$$P = \frac{H}{L} \quad \dots(4. 3)$$

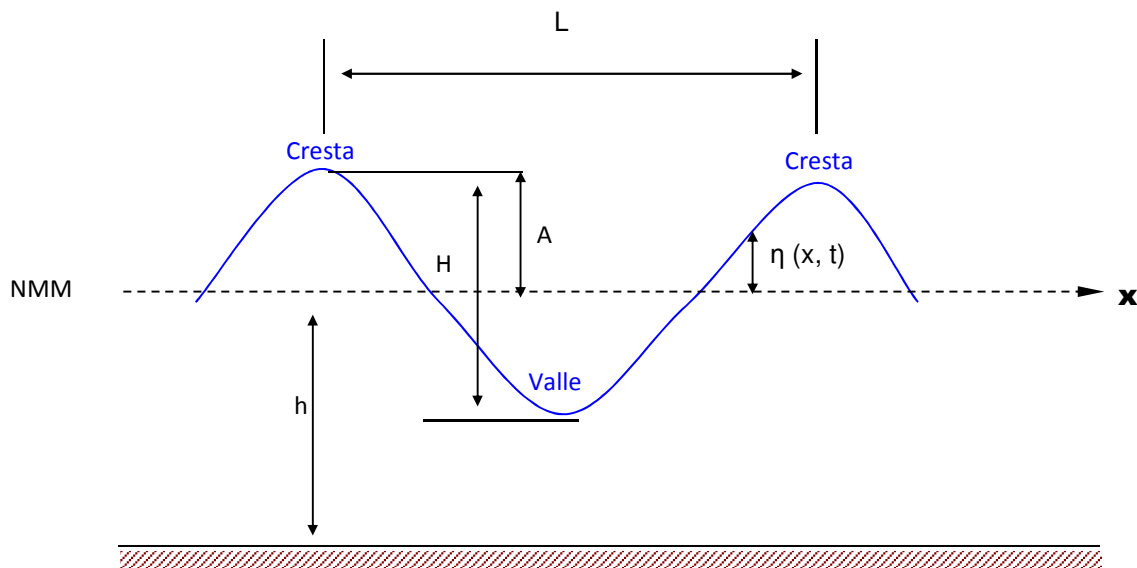
Las olas se pueden clasificar de acuerdo al tipo de peralte:

$H / L < 1/100$	Olas pequeñas
$1/25 < H / L < 1/100$	Olas moderadas
$1/25 < H / L < 1/7$	Olas grandes

- **Elevación de la ola ( $\eta_{(x,t)}$ ).**- Es la elevación de la superficie del agua con respecto al nivel medio en reposo, en función de la distancia horizontal (x) y del tiempo (t). En la parte más elevada de la ola, en la cresta, la elevación es igual a la amplitud de la ola. (Macdonel et al, 1999)
- **Altura significantes de la ola ( $H_{1/3}$ ).**- Es el promedio del tercio superior de todas las alturas de olas observadas. (Macdonel et al, 1999)

En la Figura 4.1 se muestra el esquema de la propagación de una ola en la dirección x. La longitud de la ola se mostrara en función de la profundidad del agua h y el periodo de ola.

Figura 4.1. Características de una ola



Fuente: (Macdonel et al, 1999)

## 4.2. Clasificación de las olas

En el mar el oleaje presenta gran diversidad en formas, sin embargo, para facilitar el estudio se clasifican de la siguiente manera:

### 4.2.1. Por su origen o energía de generación

#### a. Olas de viento o sea

Se encuentran dentro de su zona de generación bajo la acción de los vientos, se caracterizan por tener crestas puntiagudas y surcos redondeados que forman rizaduras superpuestas, causadas por vientos locales. Se caracteriza por tener un periodo corto, poca longitud, gran pendiente y no presenta dirección definida. Este tipo de olas no son materia de estudio en la presente tesis. (Macdonel et al, 1999)

#### b. Olas Swell o de fondo u ola libre o pura

Son olas que no están bajo la influencia directa del viento, por lo tanto, la ola evoluciona libremente, desplazándose decenas de kilómetros desde su zona de origen y siguiendo la misma dirección del viento que las generó. Se propagan desde aguas profundas a aguas poco profundas. Las olas Sea se convierten en olas SWELL una vez que salen del área de generación. Son ondulaciones con crestas y senos redondeados, presentan mayor longitud, altura, periodo, orden que las Olas Sea. (Macdonel et al, 1999)

### c. Olas de Tsunamis

Son olas en la superficie del mar de desplazamiento rápido y repentino, como los originados por placas tectónicas, sismos submarinos, derrumbes, erupción volcánica, entre otros, los cuales desplazan masas de agua a grandes profundidades. Se caracterizan por tener una amplitud pequeña, longitud de onda larga y se desplaza a gran velocidad. En alta mar no es muy perceptible, pero en aguas poco profundas sufre el efecto de fondo y se vuelven destructivas. (Macdonel et al, 1999)

#### 4.2.2. Por la profundidad en que se encuentran

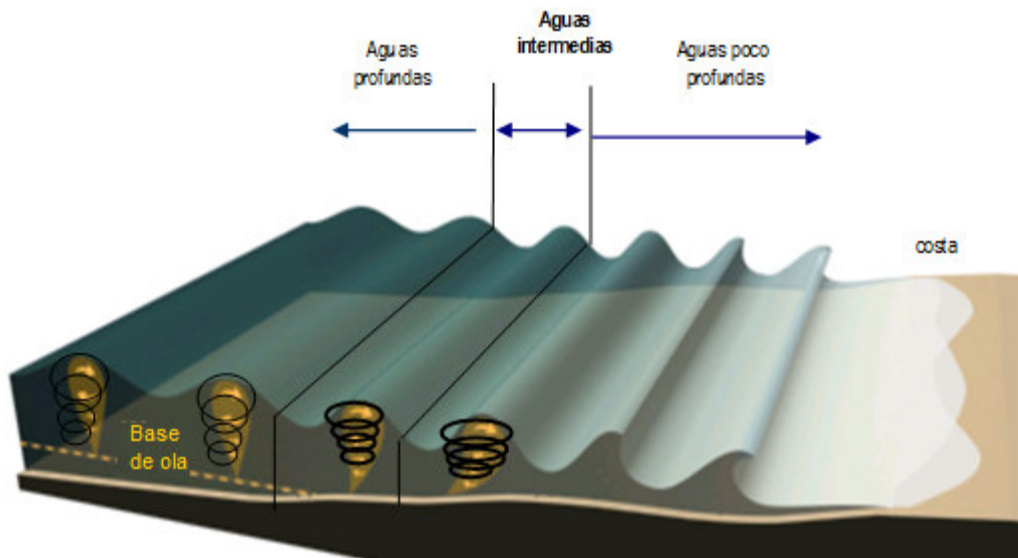
Las partículas de agua dentro de una ola generalmente se mueven en orbitas elípticas en aguas poco profundas e intermedias y en orbitas circulares en aguas profundas.

Tabla 4.1. Clasificación de los tipos de olas

Tipo de ola	Valores	Características
Aguas poco profundas	$\frac{h}{L} \leq \frac{1}{25}$	La longitud de fondo altera la forma del movimiento orbital, de circular a elíptico o cercano al elíptico
Aguas intermedias	$\frac{1}{25} < \frac{h}{L} < \frac{1}{2}$	Se propagan en zonas intermedias
Aguas profundas	$\frac{h}{L} \geq \frac{1}{2}$	Se propagan donde el fondo marino no tiene una influencia significativa sobre el movimiento de las partículas.

Fuente: (D'Angremond K & Van der Velden, 1980)

Figura 4.2. Tipos de olas en el mar.



Fuente: (Meted, 2012)

#### 4.2.3. Por el Periodo

##### a. Olas capilares

Olas de viento de periodo inferior a 0.1seg. Están controladas por la tensión Superficial y la gravedad. (Fuentes, 2001)

##### b. Olas ultragravedad

Olas de viento de periodo muy corto que varía entre 0.1 - 1 seg. Están controladas por la tensión Superficial y la gravedad. (Fuentes, 2001)

##### c. Olas de gravedad

Olas de viento de periodo entre 1 - 30seg. Mas importantes para el diseño portuario. Están controladas por la gravedad. (Fuentes, 2001)

##### i. Olas swell

$$T = 7 - 30 \text{ seg}$$

##### ii. Olas sea

$$T = 1 - 7 \text{ seg}$$

##### d. Olas infragravedad

Olas generadas por el viento cuyo periodo oscila entre 30seg a 5 min. Están controladas por la gravedad y Coriolis. (Fuentes, 2001)

**e. Olas de marea**

Son oscilaciones periódicas del nivel del mar, provocadas por la fuerza gravitacional del Sol y la Luna sobre la Tierra. Son olas de periodo muy largo en el orden de horas y su longitud en el orden de kilómetros.

**f. Olas de periodo largo**

Son generadas por cambios meteorológicos o movimientos sísmicos. (Fuentes, 2001)

**i. Seiches**

Es un fenómeno natural encontrado en casi todos los cuerpos de agua encerrados, cuando la masa es afectada por cambios meteorológicos, como la variación atmosférica o tormentas en la zona. Tienen periodos muy largos de 10 a 60 min.

**ii. Tsunamis**

Generados por deslizamientos de tierra submarina, debido a sismos, actividades volcánicas, entre otros y las olas de marea (vertical), tiene periodos entre 7 a 50 min.

**4.2.4. Por la longitud**

**a. Olas largas**

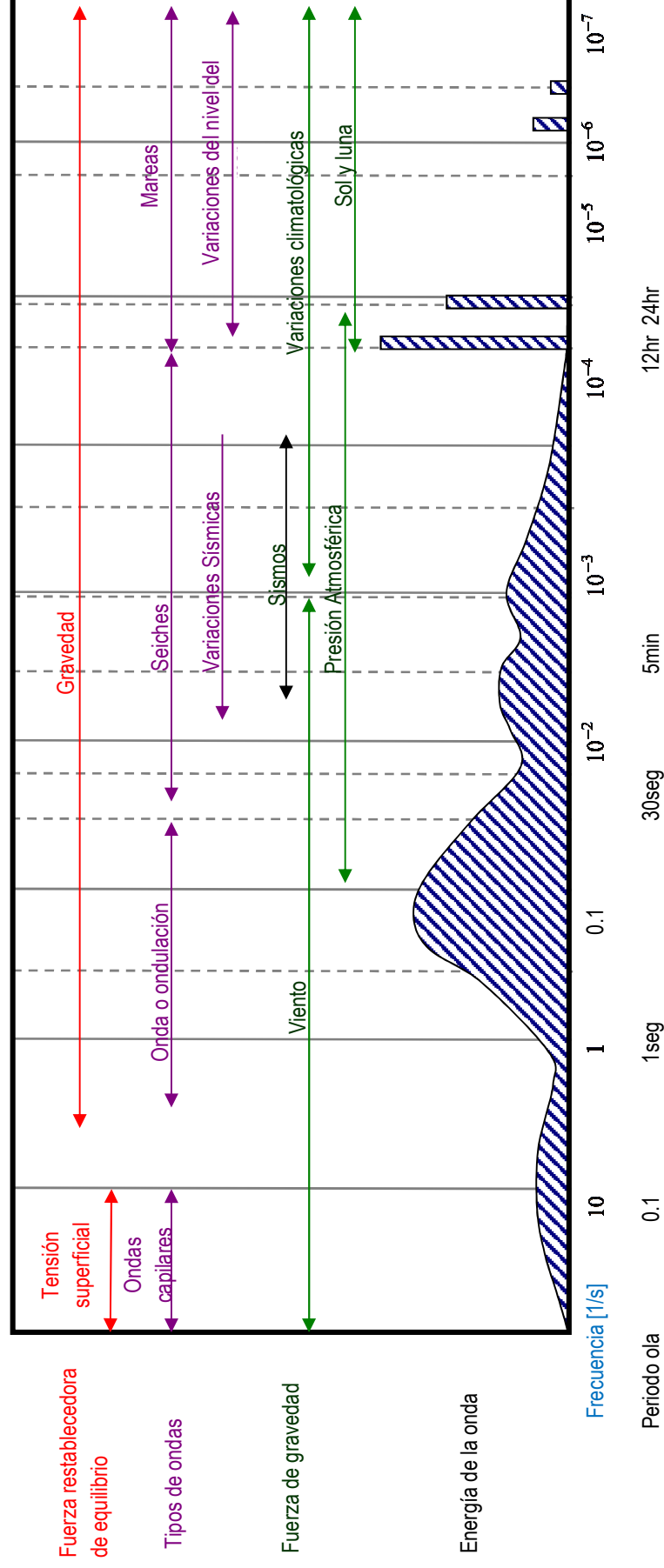
Cuando la longitud es mayor a la profundidad ( $L > h$ ).

**b. Olas cortas**

Cuando la longitud es menor a la profundidad ( $L < h$ ).

En la Figura 4.3, se observa la clasificación de las olas de acuerdo a su periodo.

Figura 4.3. Representación esquemática de los tipos de olas que existen en la superficie del océano y de la energía contenida en ella



Fuente: (Munk, 1950) y (Fernandez, 2006)

#### **4.3. Procesos de propagación del oleaje hacia la costa**

El proceso de propagación del oleaje hacia la zona costera presenta 3 etapas (USACE, 2002):

- i) Zona de Generación de las olas (por viento) o “sea”
- ii) Zona de propagación (sea + swell).
- iii) Zona de transformación (Swell)

Las olas se originan en el mar abierto y se forma cuando el viento sopla sobre la superficie marina; mientras el viento está soplando se generan olas confusas, sin una dirección definida. Así mismo, al oleaje en el área de generación de olas o fetch, se le denomina oleaje “sea” o mar de viento.

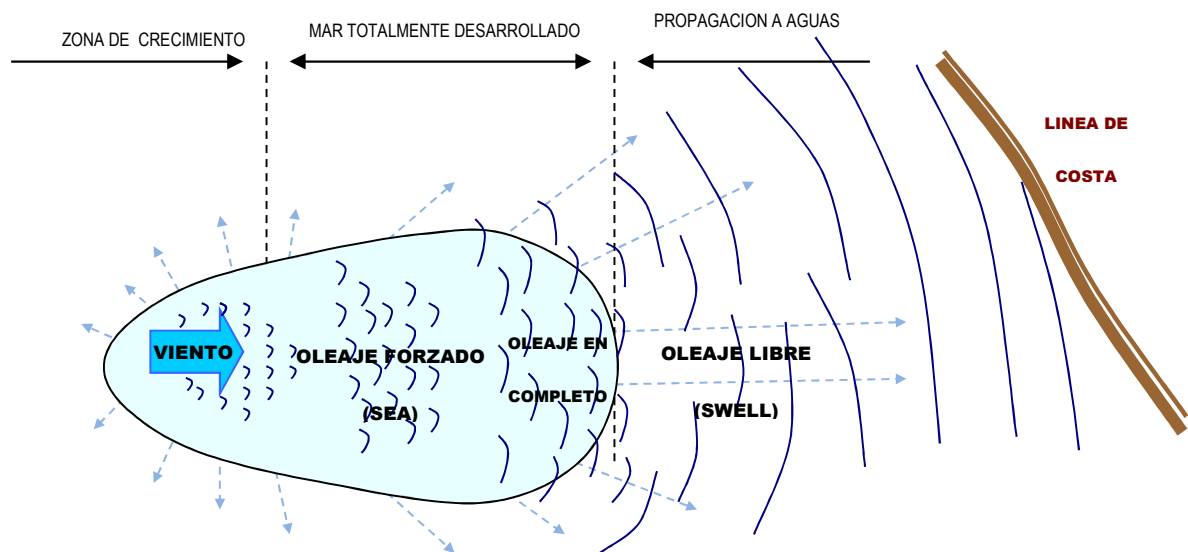
Bajo la acción continuada del viento, las olas “sea” es irregular, escarpadas con crestas cortas, llena de olas pequeñas y ondulaciones y muchas veces cubiertas de espuma. A esta zona se le denomina oleaje totalmente desarrollado.

Cuando el oleaje ha abandonado el área de generación, se van propagando de acuerdo con su celeridad “C”. Las olas de mayor periodo viajan más rápido y se caracterizan por su mayor simetría y por presentar un aspecto más ordenado. En esta fase el “sea” se convierte en “swell” o mar de fondo. Las olas “swell es relativamente regular con inclinaciones suaves, lisa y con crestas largas. (USACE, 2002)

Las olas sea como las swell, después de haber recorrido una cierta distancia, pueden acercarse a una costa, sufriendo cambios y rompiéndose cercano a costa.

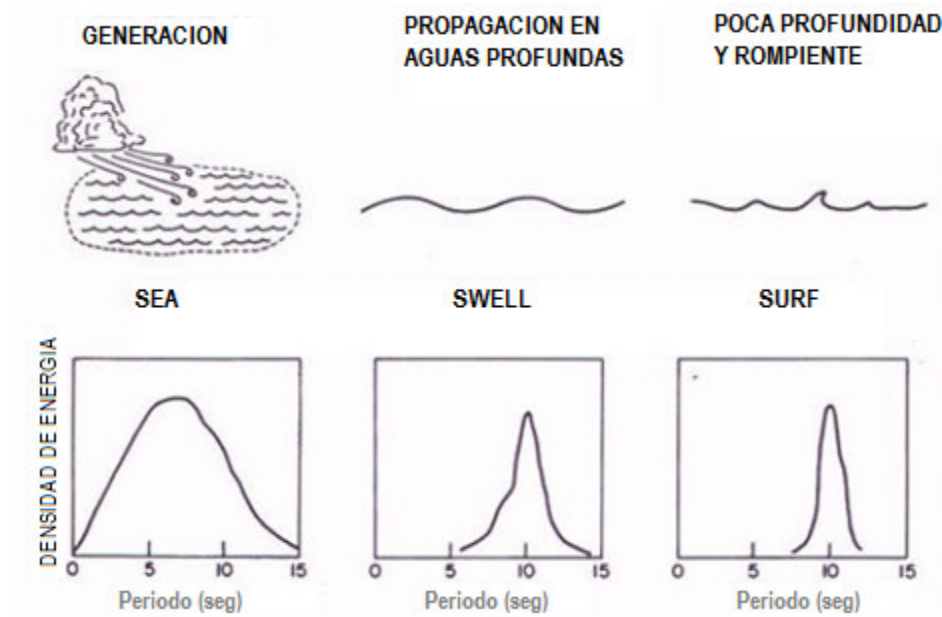
La presente tesis, abarca solo la zona de transformación de las olas, abordándose solo las olas tipo SWELL.

Figura 4.4. Acción de un viento constante sobre una zona determinada del mar



Fuente: (Fernandez, 2006)

Figura 4.5. Ilustración del desarrollo del oleaje (Komar, 1973)



Fuente: (Komar, 1973)

#### 4.4 Hipótesis básicas del movimiento de las olas

El movimiento de las olas en el mar es de naturaleza irregular y son complejas, no son tan sencillas de representar por medio de ecuaciones generales, sobre todo en la zona de



generación (fech). En aguas oceánicas, las olas presentan una estructura más regular con largas crestas y una forma casi sinusoidal, estas olas viajan miles de kilómetros y se mezclan con olas locales.

#### 4.4.1. Celeridad y longitud de la ola

La ecuación general de la celeridad de acuerdo a la profundidad:

$$C = \frac{gT}{2\pi} Tgh \left( \frac{2\pi h}{L} \right) \quad \dots(4.4)$$

Donde:

h= Profundidad (m)

L: Longitud de la ola (m)

T: Periodo (s)

G: Aceleración de la gravedad (m/s<sup>2</sup>)

sabiendo que  $C = L/T$ , deducimos que la longitud de olas es:

$$L = \frac{gT^2}{2\pi} Tgh \left( \frac{2\pi h}{L} \right) \quad \dots(4.5)$$

$$\text{Para aguas profundas } \frac{h}{L} > \frac{1}{2} \quad \rightarrow \quad C = \frac{gT}{2\pi} = 1.56.T \quad \dots(4.6)$$

$$\text{Para aguas poco profundas } \frac{h}{L} < \frac{1}{25} \quad \rightarrow \quad C = \sqrt{gh} \quad \dots(4.7)$$

#### 4.4.2. Celeridad de grupo

En la naturaleza, las olas grandes tienden a reunirse en grupos, la celeridad de grupo, es la velocidad de un conjunto de olas que se propaga en el océano. La velocidad de grupo la misma con la que viaja la energía del oleaje. La definición de celeridad de grupo es:

$$C_g = \frac{\Delta\omega}{\Delta k} \quad \dots(4.8)$$

donde:

$$\omega = \frac{2\pi}{T} \quad \dots(4.9) \quad \text{: Frecuencia angular de la ola}$$

$$k = \frac{2\pi}{L} \quad \dots(4.10) \quad \text{: Numero de ola}$$

La velocidad de grupo se describe:

$$C_g = C + k \frac{dC}{dk} = \frac{C}{2} \left[ 1 + \frac{2kh}{\sinh(2kh)} \right] \quad \dots(4.11)$$

Donde

h: Profundidad promedio (m)

C: Celeridad (m/s)

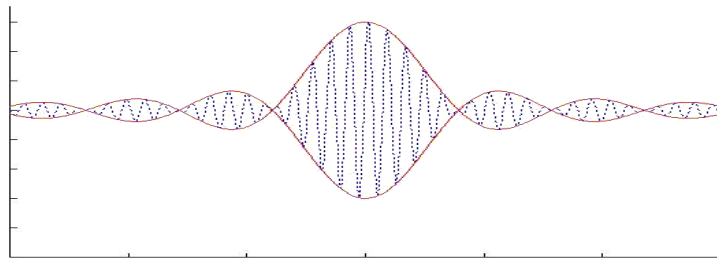
K: Numero de ola (1/m)

El uso de aproximaciones de la ecuación de dispersión, tenemos que:

- Celeridad de grupo en aguas profundas:  $C_g = \frac{C}{2}$  ... (4. 12)

- Celeridad de grupo en aguas profundas:  $C_g = \sqrt{gh} = C$  ... (4. 13)

Figura 4.6. Representación de la celeridad de grupo



Fuente: (UNIVERSIA)

Se observa que en aguas profundas, la celeridad de grupo es igual a la mitad de la velocidad individual de cada ola, en cambio en aguas someras ambas velocidades son iguales.

Figura 4.7. Velocidad de grupo



Fuente: (Meted, 2012)

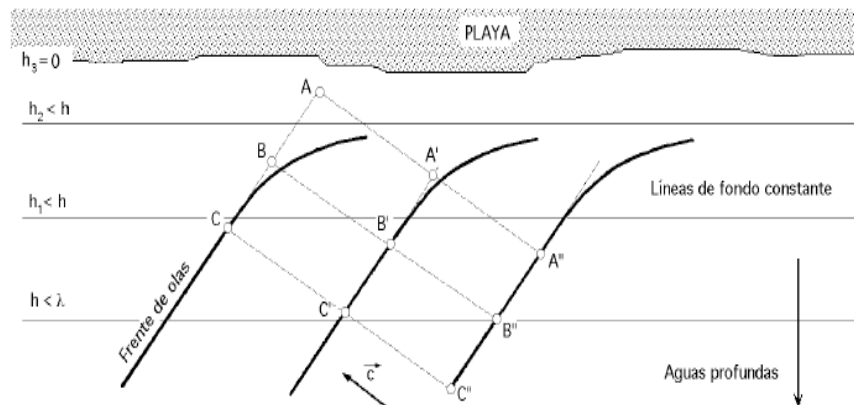
## 4.5. Transformación del oleaje en las proximidades de las costas

### 4.5.1. Refracción de las olas

La refracción tiene lugar cuando un tren de olas incidiendo oblicuamente sobre la costa encuentra un cambio de profundidad, en este caso una parte del frente de la ola viaja en aguas someras y, por tanto, con menor celeridad que el resto dando lugar a un cambio de dirección. (GIOC, 2000) Figura 4.8.

Así mismo el frente de propagación de la ola al acercarse a playa, tiende a adaptarse a las curvas de fondo del mar. Por ejemplo si hay una estructura marina o una isla, las olas tienden a rodearla, llegando a encontrarse por detrás de él (proceso de disipación).

Figura 4.8. Refracción de un tren de olas



Fuente: (USACE, 2002)

El fenómeno de refracción obedece a la ley de Snell, lo cual para una batimetría recta y paralela, se define como:

$$\frac{\text{Sen}\beta}{\text{Sen}\beta_o} = \frac{C}{C_o} = \frac{L}{L_o} \quad \dots(4.14)$$

donde:

- $\beta$       Angulo comprendido entre el frente de la ola y la curva de nivel del fondo
- $\beta_o$      Angulo comprendido entre el frente de la ola y la curva de nivel del fondo a la profundidad  $h = \lambda / 2$ .

En zonas de poca profundidad  $h < \lambda / 2$  , la altura  $H$  de la ola se puede poner escribir de la siguiente forma:

$$H = K_S K_R H_o \quad \dots(4. 15)$$

$K_S$       Coeficiente para aguas poco profundas

$$K_S = \sqrt{\frac{C_{go}}{C_g}} \quad \dots(4. 16) \quad \wedge \quad C_{go} = \frac{C_o}{2} \quad \dots(4. 17)$$

$C_{go}$ : Celeridad grupo en aguas profundas (m/s)

$C_g$ : Celeridad de grupo en aguas poco profundas (m/s)

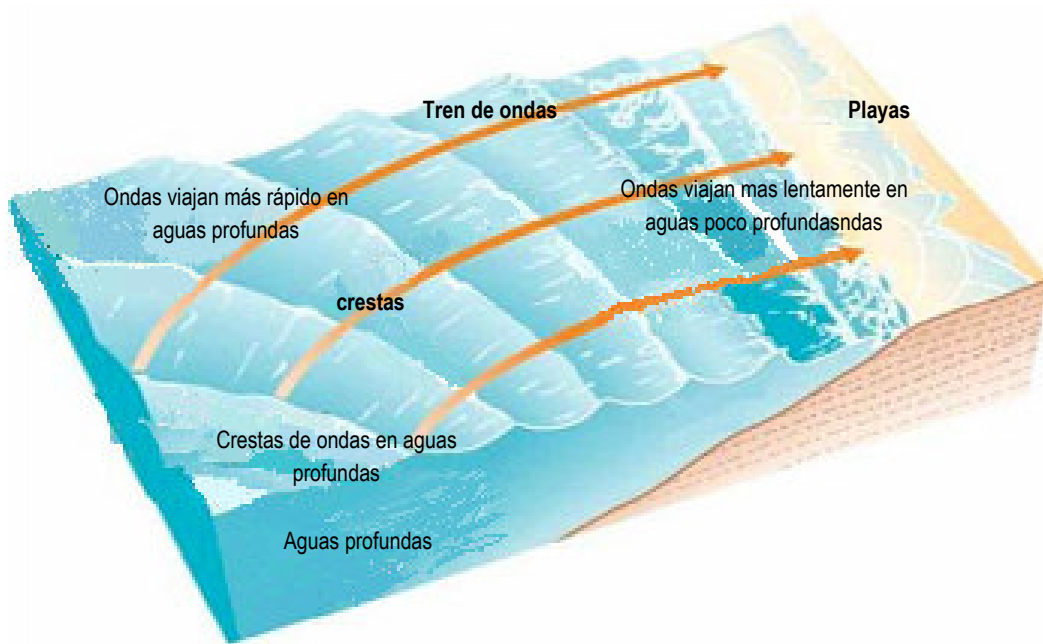
$$C_g = \frac{c}{2} \left( 1 + \frac{4\pi h / L}{\sinh(4\pi h / L)} \right) \quad \dots(4. 18)$$

$K_R$       Coeficiente de refracción

$$K_R = \sqrt{\frac{\cos \beta_o}{\cos \beta}} \quad \dots(4. 19)$$

$H_o$       Altura de olas en aguas profundas

Figura 4.9. Propagación del tren de olas



Fuente: (Meted, 2012)

#### 4.5.2. Difracción

La difracción es la dispersión de la energía del oleaje a sotavento de una barrera, permitiendo la aparición de pequeños sistemas de olas en aguas protegidas por un obstáculo. Figura 4.10.

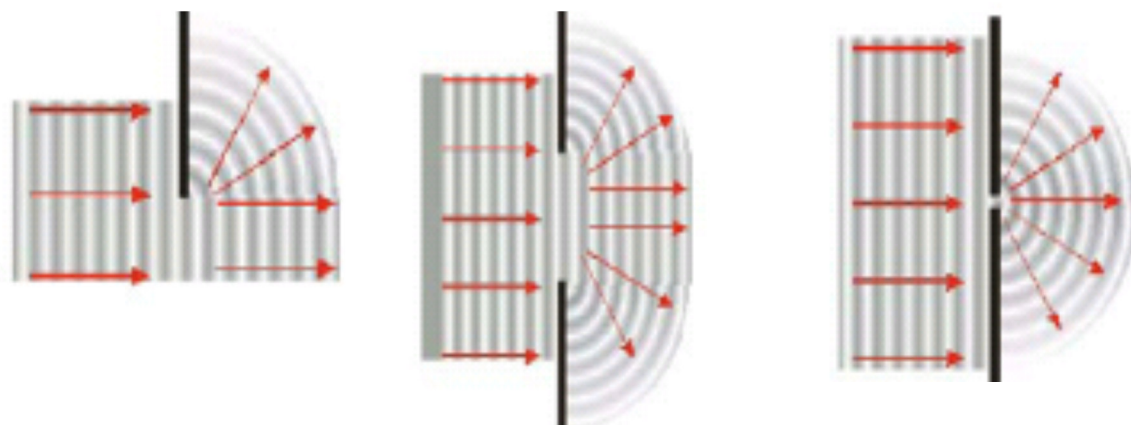
Cuando la ola pasa al otro lado de la barrera, el frente de olas adopta una forma circular, entrando en una zona de calma por detrás de la barrera, disminuyendo su altura en esa zona, mientras que la celeridad y la longitud ( $L$ ) de la ola no se modifican.

Este fenómeno se puede caracterizar mediante un coeficiente de difracción  $K_d$  que se encuentra tabulado, que permite calcular la altura difractada ( $H_d$ ) de la ola en la zona de difracción, y se define como:

$$K_d = \frac{H_d}{H} \quad \dots(4.20)$$

$K_d$ : Coeficiente de difracción, está en función del ángulo  $\alpha$  del oleaje incidente con respecto a la longitud de la barrera, así como de la profundidad del agua.

Figura 4.10.- Difracción de olas en estructuras marinas

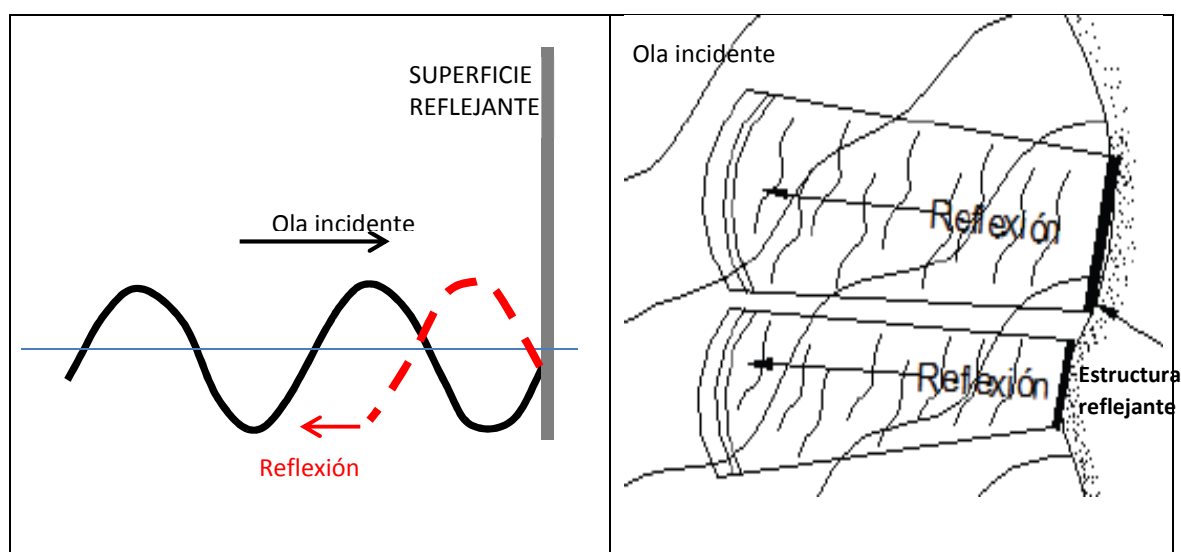


Fuente: (USACE & U.S. Army Corps of Engineers, 2002)

#### 4.5.3. Reflexión de las olas

La reflexión se produce cuando la ola choca contra un obstáculo vertical (barrera), la ola se refleja con muy poca pérdida de energía. Si el tren de olas es regular, la suma de las olas incidentes y reflejada origina una ola estacionaria, en la que se anulan mutuamente los movimientos horizontales de las partículas debidas a las olas incidentes y reflejadas, quedando solo el movimiento vertical de altura doble, y por lo tanto, de energía doble a la incidente.

Figura 4.11. Reflexión de olas



Fuente: (USACE & U.S. Army Corps of Engineers, 2002)

#### **4.5.4. Rotura del oleaje**

A medida que el oleaje se acerca a la costa cambia debido a que empieza a notar el fondo. En este proceso la altura de ola crece hasta que es aproximadamente igual al calado de agua, y entonces se inestabiliza y rompe. Esto es debido a que la velocidad de las partículas de agua en la cresta de la ola excede a la de la propia ola, provocando la inestabilidad de la zona cercana al pico de la cresta que acaba colapsando.

Se distinguen tres tipos de rotura: spilling, plunging y surfing, dependiendo de la forma en que rompe la ola, y cada una de ellas puede asociarse a un tipo de playa y oleaje.

##### **4.5.4.1. Rotura tipo spilling (derramante o continua).**

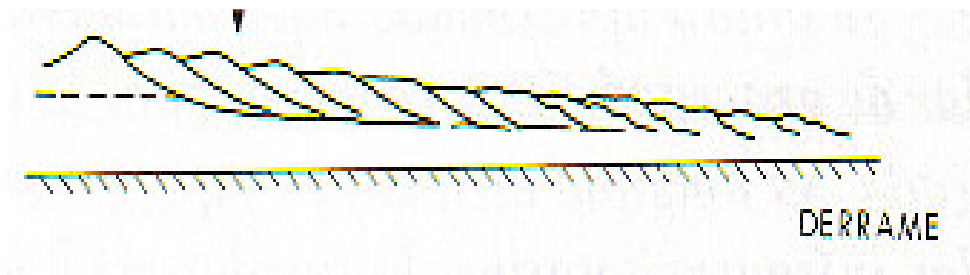
Consiste en la rotura gradual de la ola hasta que la cresta, la cual se inestabiliza y cae en forma de cascada (rompe muy suavemente), suele ocurrir en playas de pendiente muy baja y con olas de altura considerable. En un amplio recorrido este tipo de olas deja tras ella la superficie llena de espuma, y no existe una línea clara de rompiente. En las figuras se observa que la ola no es muy pronunciada y llena de espuma

##### **4.5.4.2. Rotura tipo plunging (rodante o vuelco).**

Son el tipo de olas que prefieren los surfistas. Se produce cuando la ola encuentra una transición brusca de la profundidad en aguas poco profundas. Se caracteriza por tener una zona de rompiente perfectamente definida, que es donde el agua de la cresta se adelanta a la ola y cae frente a ella, formando un bucle o tubo; produciendo mucha espuma y turbulencia y disipando gran cantidad de energía en espacios relativamente cortos. Este tipo de ola puede causar mucho más erosión en las playas frente a otros tipos de olas, ya que presenta forma tubular y rompe con mucha fuerza, produciendo fuerte erosión en las playas.



Figura 4.12. Caracterización rotura tipo spilling (a)Gráfica (b) Real



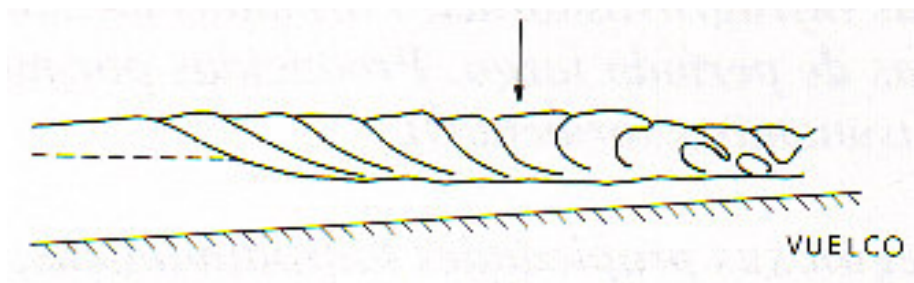
(a)



(b)

Fuente: (Dinamica Marina)

Figura 4.13. Caracterización rotura tipo plunging (a)Gráfica (b) Real



(a)



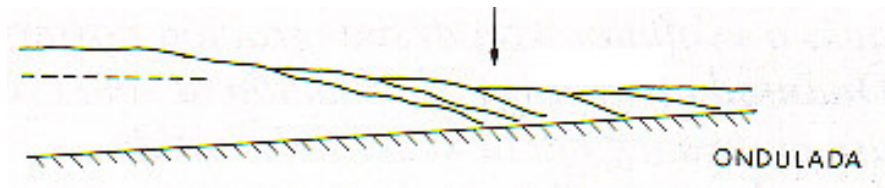
(b)

Fuente: (Dinamica Marina)

#### 4.5.4.3. Rotura tipo Surfing (ondulante).-

Se produce en costas con pendientes extremadamente empinadas, tales como las que se encuentran en playas rocosas. La zona de rompiente es muy estrecha y más de la mitad de la energía de la ola se refleja hacia el mar. En este tipo de rotura el agua está muy profunda debajo de ellos, motivo por el cual no pierden velocidad ni ganan altura. La zona de rompiente queda definida casi en la línea de costa.

Figura 4.14. Caracterización rotura tipo Surfing



(a)



(b)

Fuente: (Dinamica Marina)

#### 4.5.5. Tipo de ola rompiente

La clasificación de las olas rompientes se identifican de acuerdo al número de Iribarren ( $I_b$ ), el cual puede ser calculado de la siguiente manera:

**Numero Iribarren ( $I_b$ ).**- En función de la altura de la ola en rotura ( $H_b$ ), denominado en este caso  $I_b$ .

$$I_b = \frac{m}{(H_b / L_o)^{1/2}} \quad \dots(4.21)$$

donde:

m: Peralte de playa

$L_b$ : Longitud de la ola en aguas profundas (m)

$H_b$  : Altura de la ola en la rompiente (m)

En la Tabla 4.2, se muestra la identificación del tipo de rompiente de acuerdo al número de Iribarren ( $I_b$ )

Tabla 4.2. Tipos de rompiente - Iribarren

Tipo de rompiente	Criterio de limite
Surging	$3.3 > I_o$
Plunging	$0.5 < I_o < 3.3$
Spilling	$I_o < 0.5$

Fuente: (Cantabria, 2000)

#### 4.6. Teoría de olas

A través de los años, el hombre ha tratado de describir los fenómenos físicos que ocurren en la naturaleza, es así que nacieron diversas teorías que describen un oleaje periódico y regular. Sabemos que las olas regulares no existen en el mar, pero se trata de representarlos de la mejor manera posible.

Las formulaciones matemáticas de teoría de olas que determinan los cambios en las propiedades de las olas (altura, periodo, dirección) cuando estas abandonan las áreas de generación y comienzan a llegar a la costa, se remontan al siglo XIX. Tales como los trabajos clásicos de Gerstener (1802), Airy (1844), Stokes (1847), Kelvin (1887) y Helmholtz (1888), muchos científicos, ingenieros y matemáticos han postulado las diferentes formas de movimientos de las olas sobre el océano y sus interacciones con el viento, con variaciones en la complejidad y exactitud, poniéndose de manifiesto que en aguas someras la complejidad de las teorías aplicables es mayor que en aguas profundas. (Guisado et al, 2010)

##### 4.6.1. Teoría de olas lineal

Esta teoría está relacionada a la teoría lineal de Airy, la cual explica que la altura de la ola es muy pequeña en comparación con su longitud y con la profundidad del mar, esta teoría es llamado también teoría de pequeña amplitud, empleando orbitas forma elíptica, quien definió la altura sobre el nivel de aguas tranquilas como “cresta”, y la que se encuentra por debajo del nivel de aguas tranquilas llamada “valle”.

### Orbitas de las partículas en aguas profundas (basada en la teoría de Airy)

Supone que los movimientos de la ola son tan pequeños que la superficie libre se puede describir mediante la ecuación: (USACE & U.S. Army Corps of Engineers, 2002)

$$\eta = \frac{1}{2} H \cdot \cos \left[ 2\pi \left( \frac{x}{L} - \frac{t}{T} \right) \right] = a \cdot \cos \theta \quad \dots(4.22)$$

$$\eta = \frac{1}{2} H \cdot \cos(k \cdot x - \omega \cdot t) = \frac{1}{2} a \cdot \cos(k \cdot x - \omega \cdot t) \quad \dots(4.23)$$

donde:

$\eta(x, t)$  Elevación de la superficie del agua en las coordenadas de espacio (x) y tiempo (t).

$a$  Amplitud de la ola

$$k = \frac{2\pi}{L} \quad \dots(4.24) \quad \text{Numero de ola}$$

$$\omega = \frac{2\pi}{T} \quad \dots(4.25) \quad \text{Frecuencia angular}$$

#### 4.6.2. Teoría de olas no lineal

En la naturaleza las olas pueden llegar a alcanzar pendientes de hasta  $H/L=0.05-0.08$ , para lo cual la hipótesis de pequeña amplitud de la ola es finita, sin embargo, en el régimen de ola larga la perturbación empleada en el régimen de Stokes pierde su validez y es necesario buscar soluciones con otro tipo de aproximación. A partir de ellas se llega a las ecuaciones no lineales de ola larga, ecuaciones de Boussinesq que tiene como solución particular la ola cnoidal y ola solitaria.

#### Teoría Stokes

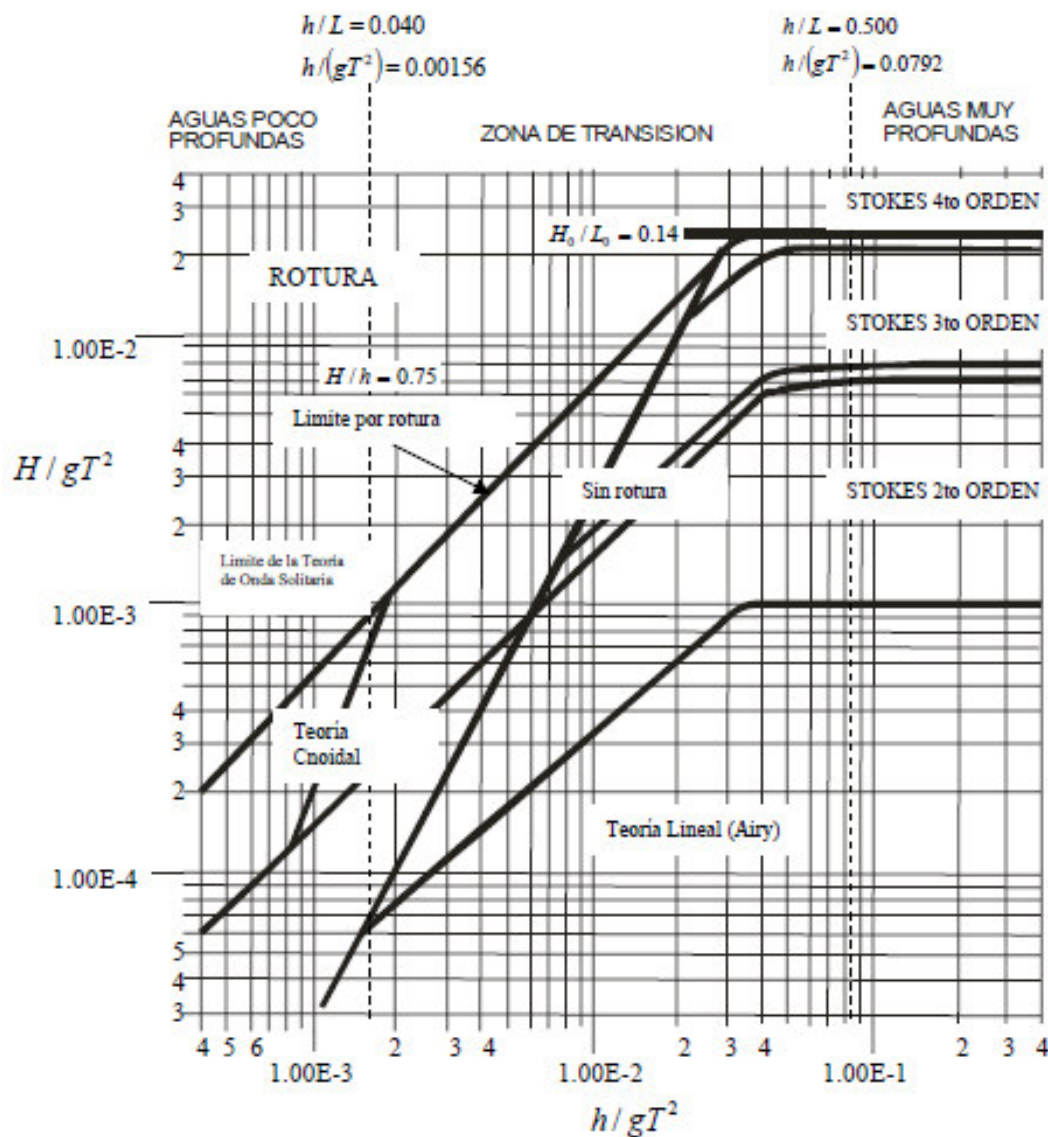
La teorías Stokes se consideran aplicables si:  $L < 8d$  con más calificaciones para cada orden, donde  $L$ = longitud de ola,  $d$ =profundidad.

- STOKES II.- Se considerarán aplicables si:  $h / (g \cdot T^2) < 0,008$  y  $0,002 < d / (g \cdot T^2)$   
{Profundidad = 300, Altura = 12 & Período = 17}
- STOKES III, se considerarán aplicables si:  $0.008 < h / (g \cdot T^2) < 0,02$   $0,01 < d / (g \cdot T^2)$   
{Profundidad = 300, Altura = 19 & Período = 15}

- STOKES IV, se considerarán aplicables si:  $0,01 < h / (g.T^2) < 0,05$   $0,01 < d / (g.T^2)$   
{Profundidad = 300, Altura = 23 & Período = 15}

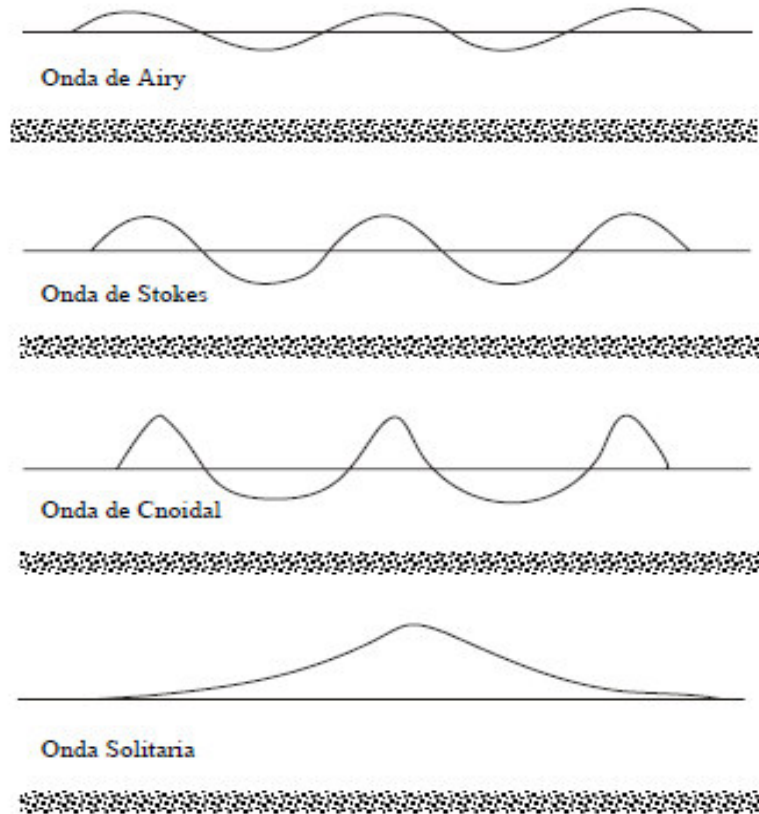
Mientras Stokes IV se utiliza generalmente para las olas extremas o el diseño también se utiliza ampliamente en el lugar de menor teorías Pide todas Stokes (II, III y IV).

Figura 4. 15. Regiones de validez de la teoría de olas



Fuente: Le Méhauté, 1976 (USACE & U.S. Army Corps of Engineers, 2002)

Figura 4.16.- Perfiles de olas de acuerdo a las diferentes teorías



Fuente: (GIOC, 2000)

#### 4.6.3. Modelos Numéricos de Olas

##### 4.6.3.1. ¿Que son modelos numéricos?

Un modelo numérico es una representación físico matemática (teórica) de un determinado fenómeno natural, que permite una mejor comprensión y estudio del proceso natural.

##### 4.6.3.2. Ecuaciones gobernantes en modelos numéricos

Las ecuaciones que gobiernan el problema de un fluido como medio continuo son las ecuaciones de conservación de la masa, cantidad de movimiento (Navier Stokes) y energía.

**Ecuación cantidad de masa.-** Suponiendo que esta es incompresible y que el periodo de la olas es despreciable comparado con la de la tierra, quedando solo a ecuación de continuidad. (GIOC, 2000)

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad \dots(4. 26)$$

### Conservación de la cantidad de movimiento

$$\rho \frac{Du}{Dt} = \rho \left( \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) \quad \dots(4. 27)$$

$$\rho \frac{Dv}{Dt} = \rho \left( \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) \quad \dots(4. 28)$$

$$\rho \frac{Dw}{Dt} = \rho \left( \frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) \quad \dots(4. 29)$$

**Ecuación energía:** De manera particular, los modelos de olas emplean como ecuación gobernante el balance de energía que es definido como:

$$\eta(t) = \eta_o + \sum_{i=1}^r a_i \cdot \text{sen}(i \cdot \omega t + \phi_i) \quad \dots(4. 30)$$

donde:

$\eta(t)$  : Elevación registrada de la superficie del agua a la hora t. (m)

$\eta_o$  : Elevación media (m)

$\omega$  :  $= 2\pi / T$  = frecuencia angular de la ola (radian/seg)

i : Numero del grupo de olas

$a_i$  : Amplitud del iesimo grupo de ola (m)

$\phi_i$  : Angulo de fase del iésimo grupo de ola

r : Número total de grupos de ola

### 4.6.4. Tipos de Modelos de Olas

#### 4.6.4.1. Por fase

##### - Modelos que resuelven la fase

Los modelos que resuelven la fase, basados en las ecuaciones no estacionarias de conservación de la masa y cantidad de movimiento integradas en vertical, son usados para condiciones de oleaje muy variables en dominios pequeños y generalmente no

consideran generación ni disipación de energía (Ris, 1997; Massel, 1996; Monbaliu et al., 2000), siendo una de las principales ventajas su buena simulación de los procesos de difracción y refracción. La aplicación de estos modelos se limita a áreas relativamente pequeñas (órdenes de kilómetros).

Entre estos se encuentran los modelos basados en la ecuación de la pendiente suave (Berkhoff, 1972) y su versión parabólica de Radder (1979), y los basados en las aproximaciones de Boussinesq (Peregrine, 1967, Madsen y Sørensen, 1992). Como ejemplo de estos modelos, tenemos en REFDIF, REFRAC, BOUSS 2D, FUNWAVE y MIKE21.

#### **- Modelos promediados en fase o modelos espectrales**

Estos modelos se basan en la conservación de la energía espectral, y asumen que las propiedades de las olas varían lentamente a escala de longitud de olas. A diferencia de los modelos que resuelve la fase, consideran los fenómenos de generación, disipación de energía y las interacciones no lineales en los que la superficie del mar es descrita por un espectro de energía (Bolaños, 2004). Estos modelos, no precisan una resolución tan pequeña, pudiendo ser aplicados en áreas mayores. Como ejemplo de estos modelos tenemos: WAN (Wave Model), WAVEWATCH III (Tolman, 1991) y el TOMAWAC para aguas profundas y SWAN, STWAVE y MIKE21 para aguas poco profundas

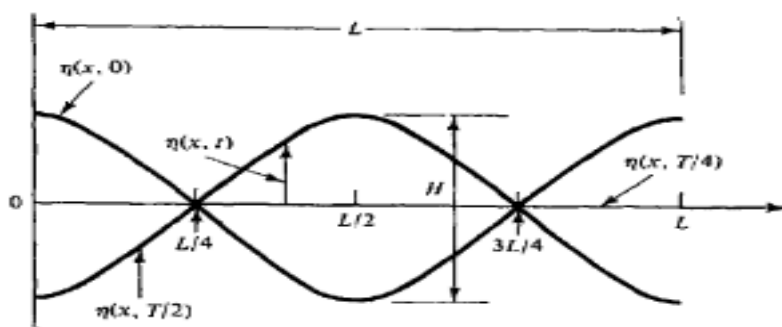
#### **4.6.4.2. Por formulación**

**- Olas Estacionarias.**- La ola estacionaria puede considerarse como la superposición de dos olas progresivas con la misma amplitud  $A$ , periodo  $T$  y dirección viajando en distinto sentido.

Una ola estacionaria oscila en el espacio  $x$ , y en el tiempo  $t$ , pero las oscilaciones se encuentran desacopladas, es decir la superficie libre oscila arriba y abajo localmente, con una amplitud que varía espacialmente y se mantiene estacionaria en el tiempo. Dicha superficie cuenta con nodos (puntos de la superficie sin movimiento alguno). Como por ejemplo REFDIF y STWAVE.



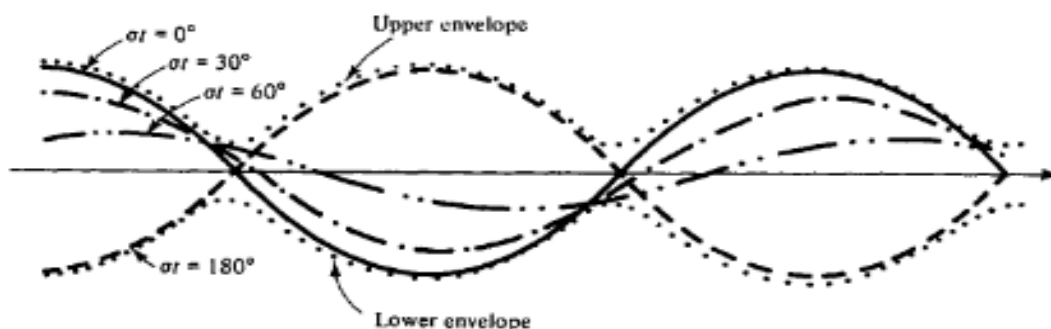
Figura 4.17. Evolución de la superficie de una ola estacionaria en el espacio en diferentes instantes de tiempo



Fuente: (GIOC, 2000)

- **Olas Cuasi estacionarias.**- Estas están asociadas al proceso de reflexión, para esto se asume que la superficie libre resulta de la superposición de una ola incidente de altura  $H_i$  y una ola viajando en sentido opuesto con una altura menor  $H_r$ . Esta reducción en la altura de la ola y el desfase  $\varepsilon$ , entre incidente y reflejada estarán asociados, en general, a que en el proceso de la reflexión parte de la ola incidente será transmitida y parte absorbida o disipada dando lugar a una reflexión imperfecta.

Figura 4.18. Evolución de la superficie de una ola cuasi- estacionaria para diferentes valores de  $\omega t$  y su envolvente.



Fuente: (GIOC, 2000)

#### 4.6.4.3. Por su aproximación

##### - Modelo Monocromático.-

En el modelo se genera oleaje con un único período ( $T$ ) y altura constante ( $H$ ) en una sola dirección. Este modelo simplifica el oleaje natural, lo complicado, es seleccionar

qué parámetros (H,T) representan al oleaje real, que incluye una gran variedad de períodos y alturas. Como por ejemplo REFDIF y RCPWAVE

- **Modelo Espectral.**- Estos modelos describen la variación en el tiempo y en el espacio de a función de densidad espectral a partir de un balance de energía.

En su forma espectral, el oleaje está constituido por infinitas componentes caracterizadas cada una de ellas por una dirección, una frecuencia y una fase. La función de densidad espectral representa el reparto de energía entre las distintas frecuencias y direcciones, por lo tanto, es bidimensional.. Ejemplo, el modelo WAM, SWAN y WAVE WATCH

Se puede expresar de la siguiente manera:

#### En aguas profundas

$$\frac{DE}{Dt} = S_{in} + S_{nl} + S_{ds} = \frac{\partial E}{\partial t} + \nabla(E.C_g) \quad \dots(4.31)$$

donde:

$S_{in}$  : Fuente Neta por aporte del viento.

$S_{nl}$  : Fuente neta debido a la interacción no lineal de las olas

$S_{ds}$  : Fuente neta debido a la pérdida de energía por unidad de área (disipación).

$\frac{\partial E}{\partial t}$  : Variaciones locales de energía

$\nabla(E.C_g)$  : Proceso advectivo

#### En aguas poco profundas

En zonas cercanas a costa la ola recorre un corto espacio, y sabiendo que la influencia de la fuente es no significativa con respecto al tiempo, se deduce que las variaciones locales de la energía  $\frac{\partial E}{\partial t}$  se desprecian, quedando solo el proceso advectivo.

$$\frac{dE}{dt} = S_{in} + S_{nl} + S_{ds} = 0 \quad \dots(4.32)$$

$$\frac{\partial E}{\partial t} = -\nabla(E.C_g) = -C_g \cdot \nabla(E) - E \cdot \nabla(C_g) = 0 \quad \dots(4.33)$$

donde:

$-C_g \cdot \nabla(E)$  : Transporte de energía por advección

$$-C_g \cdot \nabla(E) = -\left[ C_{gx} \frac{\partial E}{\partial x} + C_{gy} \frac{\partial E}{\partial y} \right] \quad \dots(4.34)$$

$-C_g \cdot \nabla(E)$  :Asomeramiento

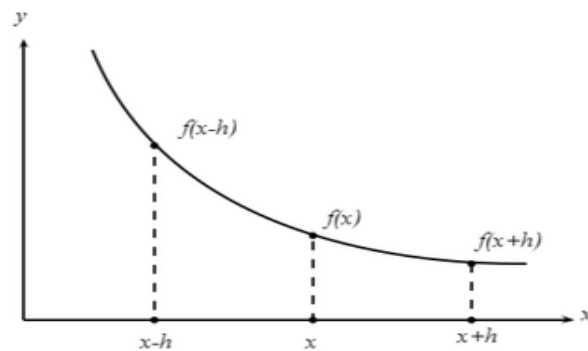
$$-E \cdot \nabla(C_g) = -E \left( \frac{\partial C_{gx}}{\partial x} + \frac{\partial C_{gy}}{\partial y} \right) \quad \dots(4.35)$$

#### 4.6.4.4. Esquema Numérico

- **Diferencias Finitas.**- Se usa comúnmente para discretizaciones sencillas con problemas de geometrías complejas.

Los modelos de diferencias finitas requieren que la totalidad de la malla de cálculo contenga celdas de las mismas dimensiones, no obstante, a fin de resolver el flujo con mayor precisión, es posible implementar un refinamiento de la malla en la región de interés de modo que se resuelva primero el dominio completo con una malla gruesa y después, el subdominio con celdas de mayor resolución, siempre y cuando sea viable

Figura 4.19. Esquema numérico



Sólo se consideran normalmente tres formas: la anterior, la posterior y la central.

Una **diferencia progresiva, adelantada o posterior** es una expresión de la forma

$$\Delta_h[f](x) = f(x+h) - f(x) \quad \dots(4.36)$$

Dependiendo de la aplicación, el espaciado  $h$  se mantiene constante o se toma el límite  $h \rightarrow 0$ .

Una **diferencia regresiva, atrasada o anterior** es de la forma

$$\nabla_h[f](x) = f(x) - f(x-h) \quad \dots(4.37)$$

Finalmente, la **diferencia central** es la media de las diferencias anteriores y posteriores. Viene dada por

$$\delta_h[f](x) = f\left(x + \frac{1}{2}h\right) - f\left(x - \frac{1}{2}h\right) \quad \dots(4.38)$$

#### - Volúmenes Finitos

El método de volúmenes finitos, es un procedimiento de discretización que integra la ecuación diferencial original sobre un volumen finito, es decir, un trozo de intervalo (1D), superficie (2D) o volumen (3D) cuya forma concreta depende de la malla y del sistema de coordenadas que se esté empleando. Independientemente de la dimensionalidad del problema se sigue hablando de volúmenes finitos cuando uno se refiere a los trozos en los que se ha subdividido el dominio. De este modo se obtienen los balances para cada una de las zonas discretas en las que se ha subdividido el dominio global. (Tenorio, 2011)

El desarrollo se presenta a continuación:

Puntos medios

$$x_{12} = \frac{x_1 + x_2}{2}, \quad \dots(4.39)$$

$$x_{13} = \frac{x_1 + x_3}{2}, \quad \dots(4.40)$$

$$x_{23} = \frac{x_2 + x_3}{2} \quad \dots(4.41)$$

Centro de gravedad

$$x_{123} = \frac{x_1 + x_2 + x_3}{3} \quad \dots(4.42)$$

Luego

$$\int_V f(x) dV \approx |V| f_{123} \quad \cdot f \in P_1(V) \quad \dots(4.43)$$

$$\int_V f(x) dV \approx |V| \frac{f_1 + f_2 + f_3}{3} \quad \cdot f \in P_1(V) \quad \dots(4.44)$$

$$\int_V f(x) dV \approx |V| \frac{f_{12} + f_{23} + f_{13}}{3} \quad \cdot f \in P_2(V) \quad \dots(4.45)$$

$$\int_V f(\mathbf{x}) dV \approx |V| \frac{3(f_1 + f_2 + f_3) + 8(f_{12} + f_{23} + f_{13}) + 27f_{123}}{60} \quad \dots(4.46)$$

### - Elementos Finitos

Por su parte, los métodos de elementos finitos permiten una mayor flexibilidad mediante la subdivisión del sistema en triángulos que pueden variar en forma y tamaño. Asimismo, permiten seguir fielmente la morfología y la batimetría de la zona de estudio además de que hacen posible una mejor representación de aquellas áreas donde la actividad hidrodinámica es más interesante e importante. Actualmente, esta aproximación es ampliamente utilizada para la descripción hidrodinámica de lagunas y áreas costeras. Esto se debe a que en estas zonas, usualmente caracterizadas por su compleja batimetría y morfología, la técnica de elementos finitos tiene la ventaja de poder proveer una adecuada resolución en las distintas áreas de interés dentro de la zona de estudio (alta resolución en las entradas y canales y baja resolución en las zonas llanas).

### Ejemplo:

$$\frac{\partial u}{\partial x} \quad \dots(4.47) \quad \wedge$$

$$u = \sum_{i=1}^m N(i) \cdot q(i) \quad \dots(4.48)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} = \frac{\partial \sum_{i=1}^m N(i) \cdot q(i)}{\partial x} \quad \dots(4.49)$$

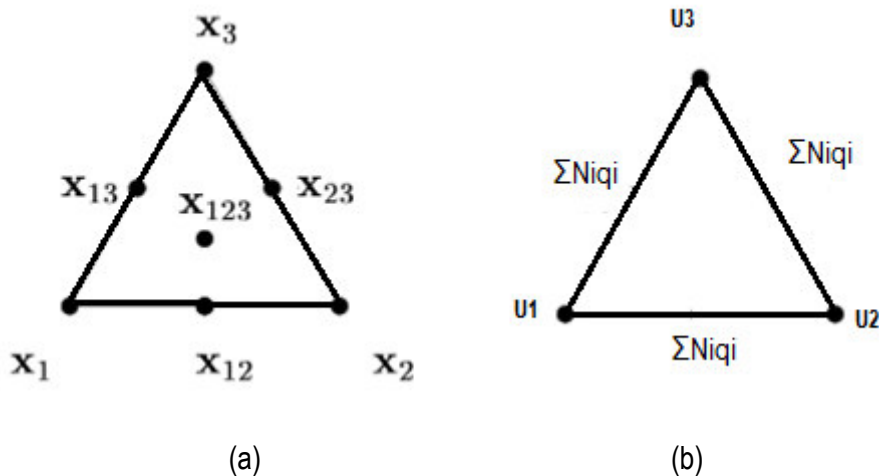


Figura 4.20. Esquema numérico. (a) Volúmenes finitos (b) Elementos finitos

## CAPITULO V

### V. DATOS EMPLEADOS

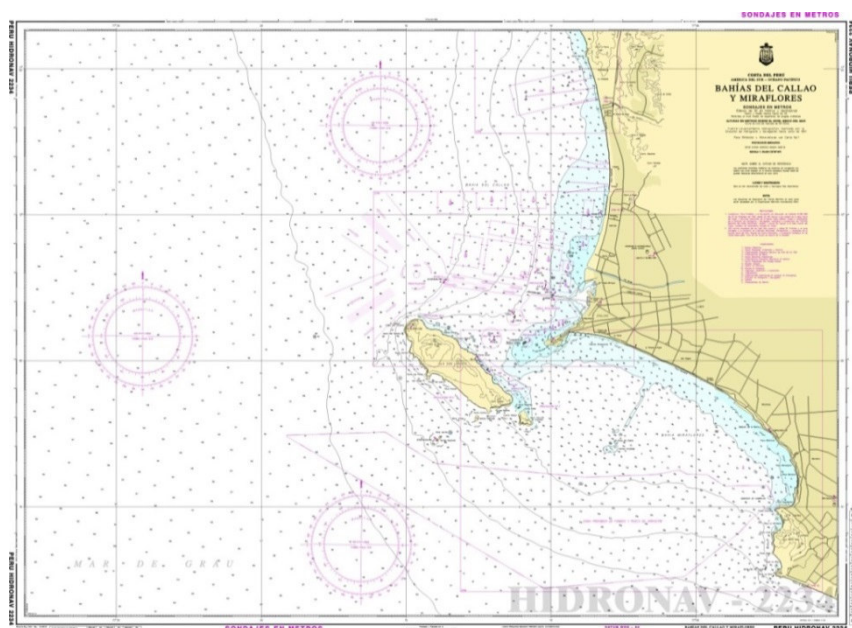
#### 5.1. Batimetría y perfil costero

Como se observa en la Figura 5.1 y Figura 5.2, el veril de los 10 metros se encuentra a una distancia aproximada de 2 km mar adentro, mientras que el veril de 20 metros se encuentra aproximadamente 9km de costa, pasando por atrás de la Isla San Lorenzo.

En la Figura 5.3, se muestra la batimetría usada para la modelación de olas, la misma que fue extraída de las cartas batimétricas N° 223 y 2236 denominadas “Bahía Ancón a Isla Pachacamac” del año 2000 y “Isla San Lorenzo a Ensenada Chorrillos” del año 1995, de la Dirección de Hidrografía y Navegación de la Marina de Guerra del Perú.

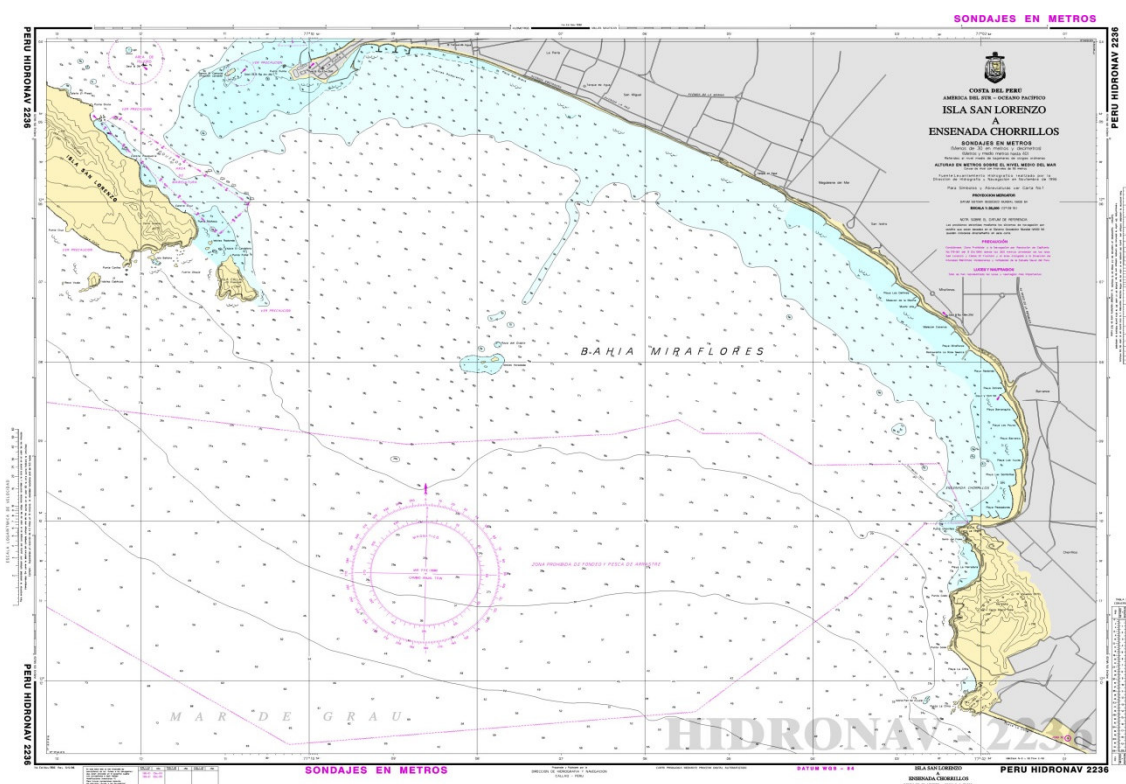
La línea de Costa en la bahía de Miraflores presenta una forma de arco, con una orientación de noroeste – sureste principalmente en los distritos de Callao, San Miguel, Magdalena y San Isidro, mientras que los distritos de Barranco y Chorrillos se ve influenciada por la presencia de punta Chorrillos, que presenta una configuración distinta que permite la formación de 2 playas (La Herradura y La Chira) muy próximas a los cerros La Virgen Y Morro Solar.

Figura 5.1. Carta batimétrica N° 223 Bahía Ancón a Isla Pachacamac.



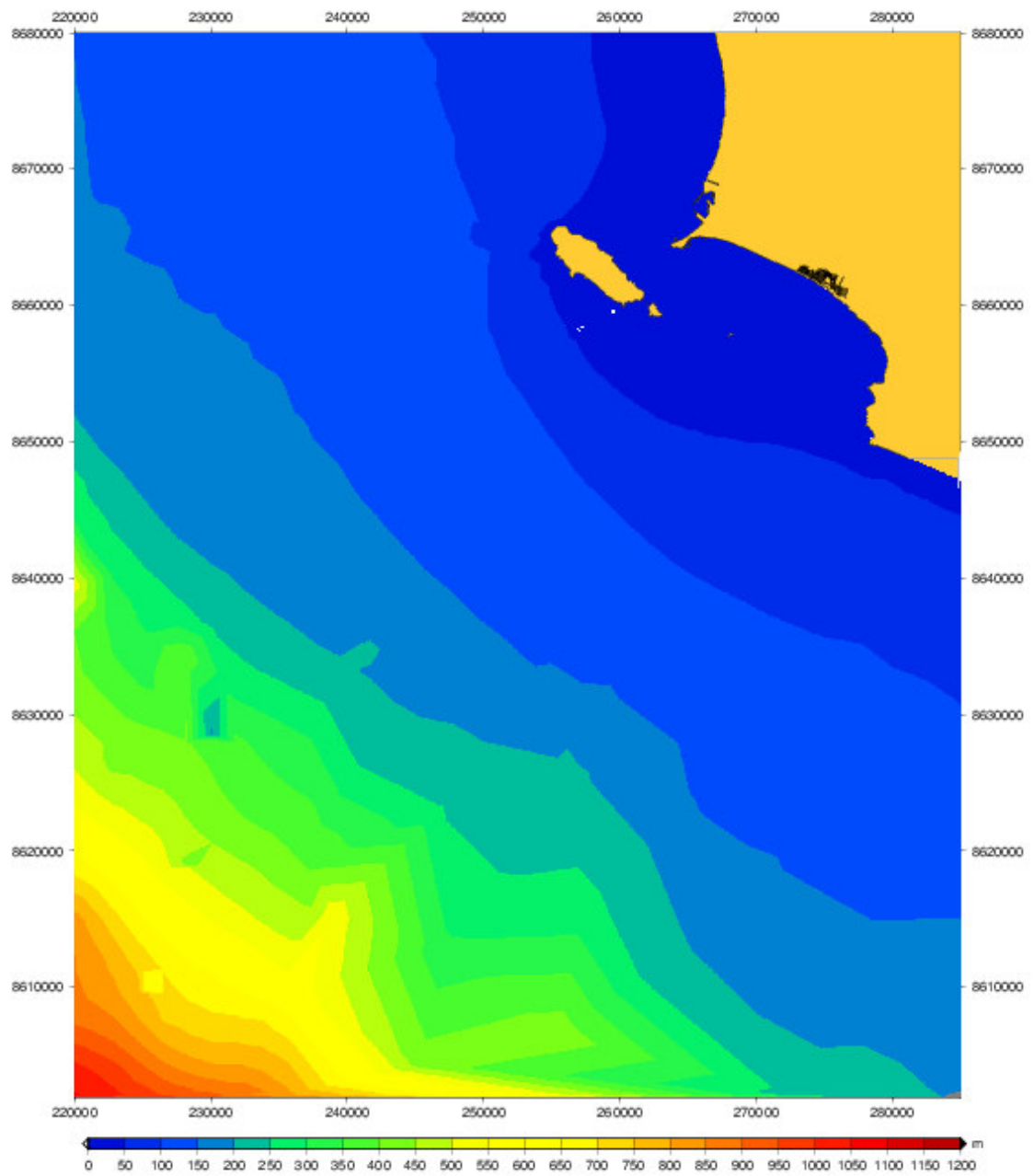
Fuente: (DHN - Carta batimetrica N°223, 2000)

Figura 5.2. Carta batimétrica N° 2236 Isla San Lorenzo a Ensenada Chorrillos.



Fuente: (DHN - Carta batimétrica N°2236, 1995)

Figura 5.3. Batimetría utilizada para la modelación



Fuente de datos: (DHN - Carta batimétrica N°2236, 1995), (DHN - Carta batimétrica N°2236, 1995) complementada con (GEBCO)

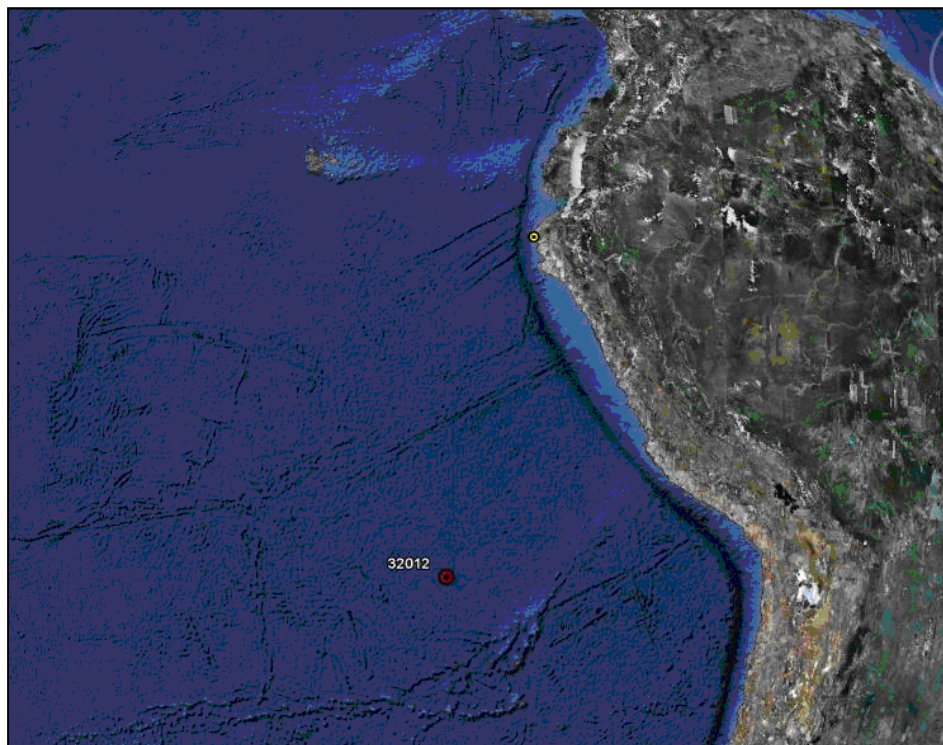


## 5.2. Clima de olas

La estadística de olas de olas en un punto en aguas profundas cercano a la zona de estudio ha sido determinada en función a los datos de reanálisis del modelo WAVE WATCH III (WW3) para febrero 2005 a julio 2013. Dicha información presenta una resolución espacial de  $0.5 \times 0.5^\circ$  y una resolución temporal de 3 horas. Esta información se encuentra disponible en la siguiente dirección web:

Para corroborar la validez de los datos de olas del modelo WAVE WATCH, se ha hecho la comparación de los resultados de olas del modelo con la información de oleaje registrada por una de la boyas National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), estación 32012, ubicada en las coordenadas 19.69Sur y 85.57Oeste (Figura 5.4), el cual contiene información histórica de altura, dirección y periodo de las olas de octubre 2007 a noviembre 2013, donde se analizaron los datos extraídos de la página del National Data Buoy Center, en la dirección web:

Figura 5.4. Ubicación de la boya NOAA 32012



Fuente: Google Earth

En la Figura 5.5 a Figura 5.7 se observan los resultados de la comparación para el mismo punto de medición, apreciándose que los resultados del modelo y los registros de la boya presentan características similares, como por ejemplo se puede apreciar que la dirección predominante de olas es del Suroeste, con altura significativa predominante que se encuentra en el rango de 2 – 3 metros. Por otro lado, el periodo predominante se encuentra en el rango de 12 – 14 segundos.

Dado que los resultados del modelo WAVE WATCH y la información de la boya NOAA (<http://www.ndbc.noaa.gov/>) muestran características similares. En la presente tesis se procede a extraer los datos del modelo WAVE WATCH para el punto correspondiente a 80 Oeste y 13.5 Sur (Figura 5.8), obteniéndose gráficos de series de tiempo de altura, dirección y periodo de olas y rosas de dirección de oleaje ( Figura 5.9 y Figura 5.10).

Figura 5.5. Comparación de la rosa de dirección de olas del modelo WAVE WATCH y los datos de la boya NOAA para el punto 19.5S - 85.5W

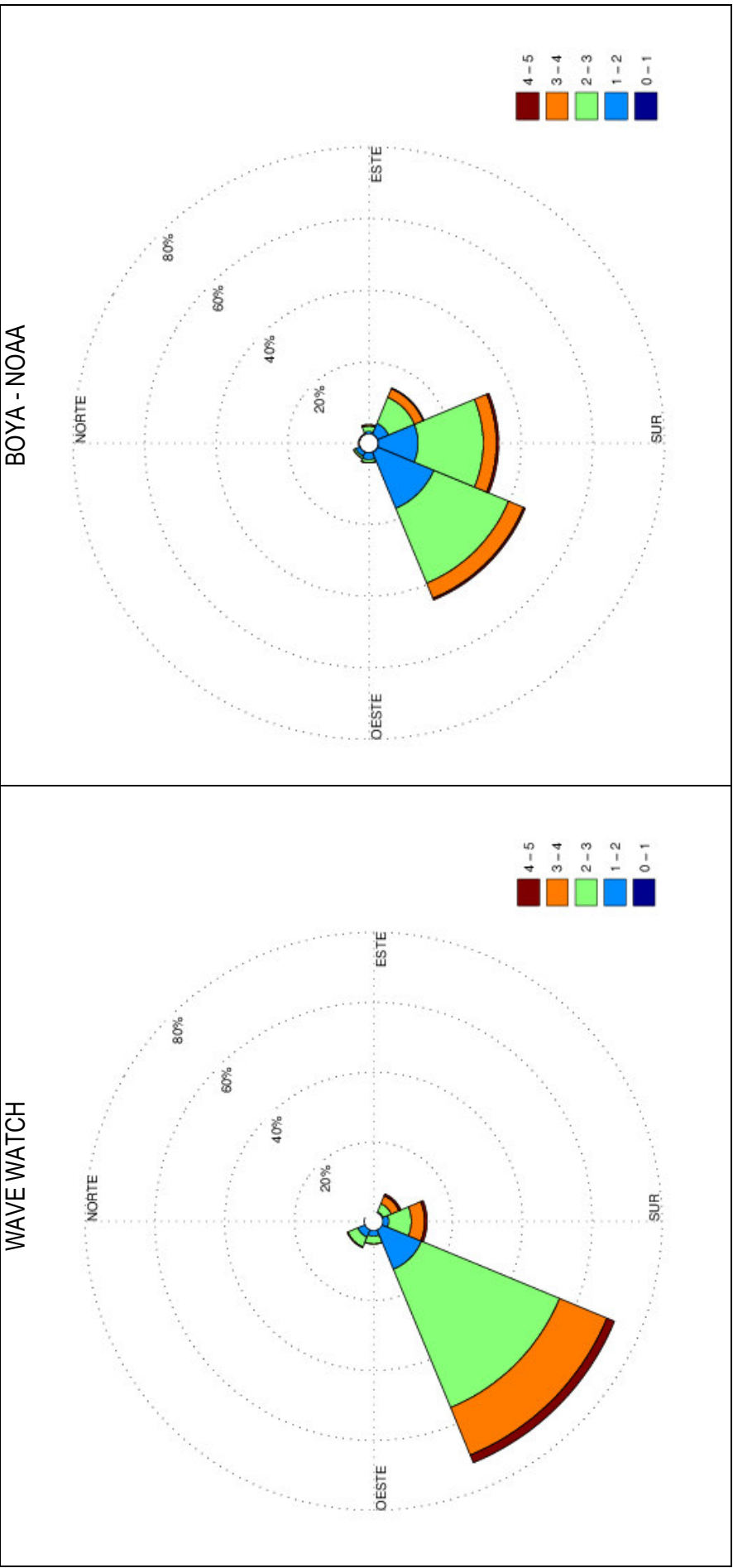
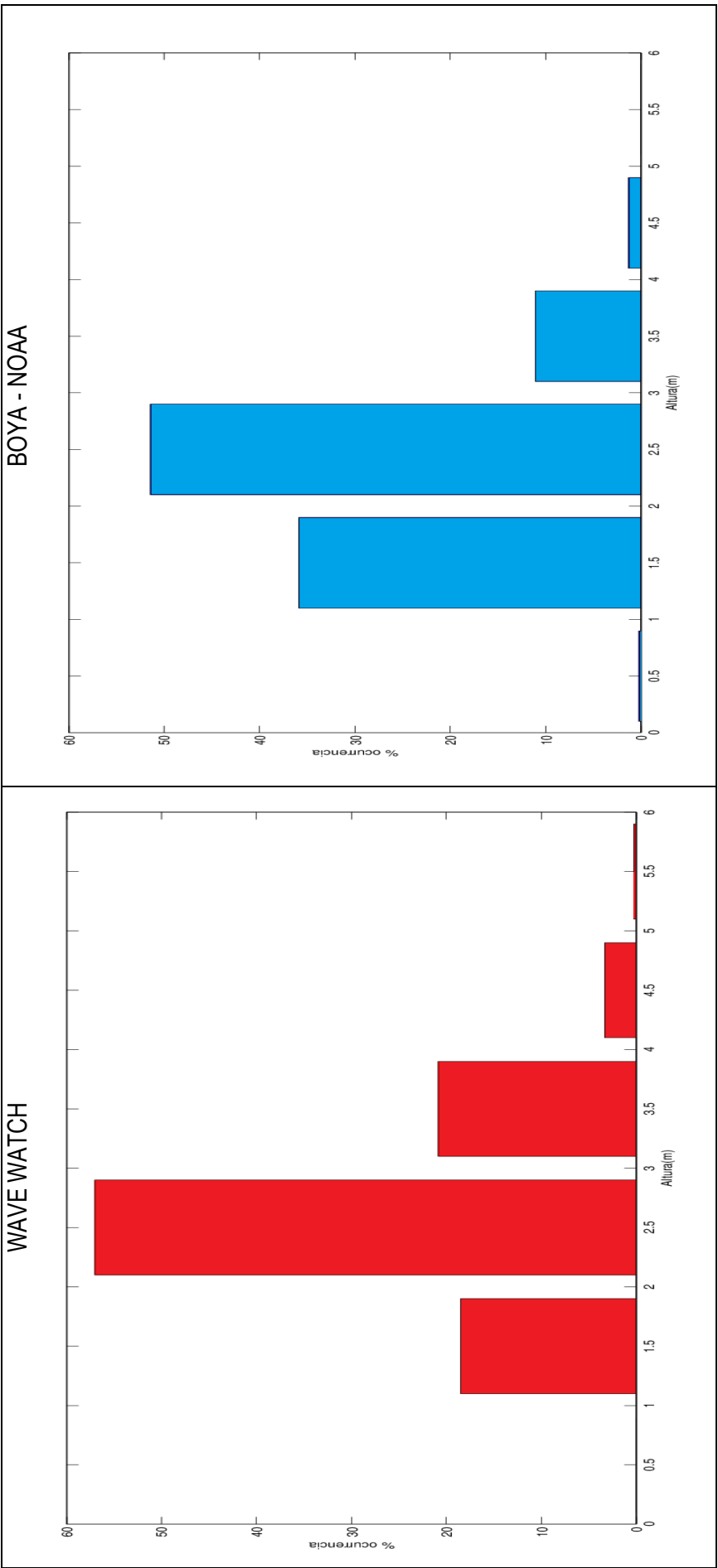
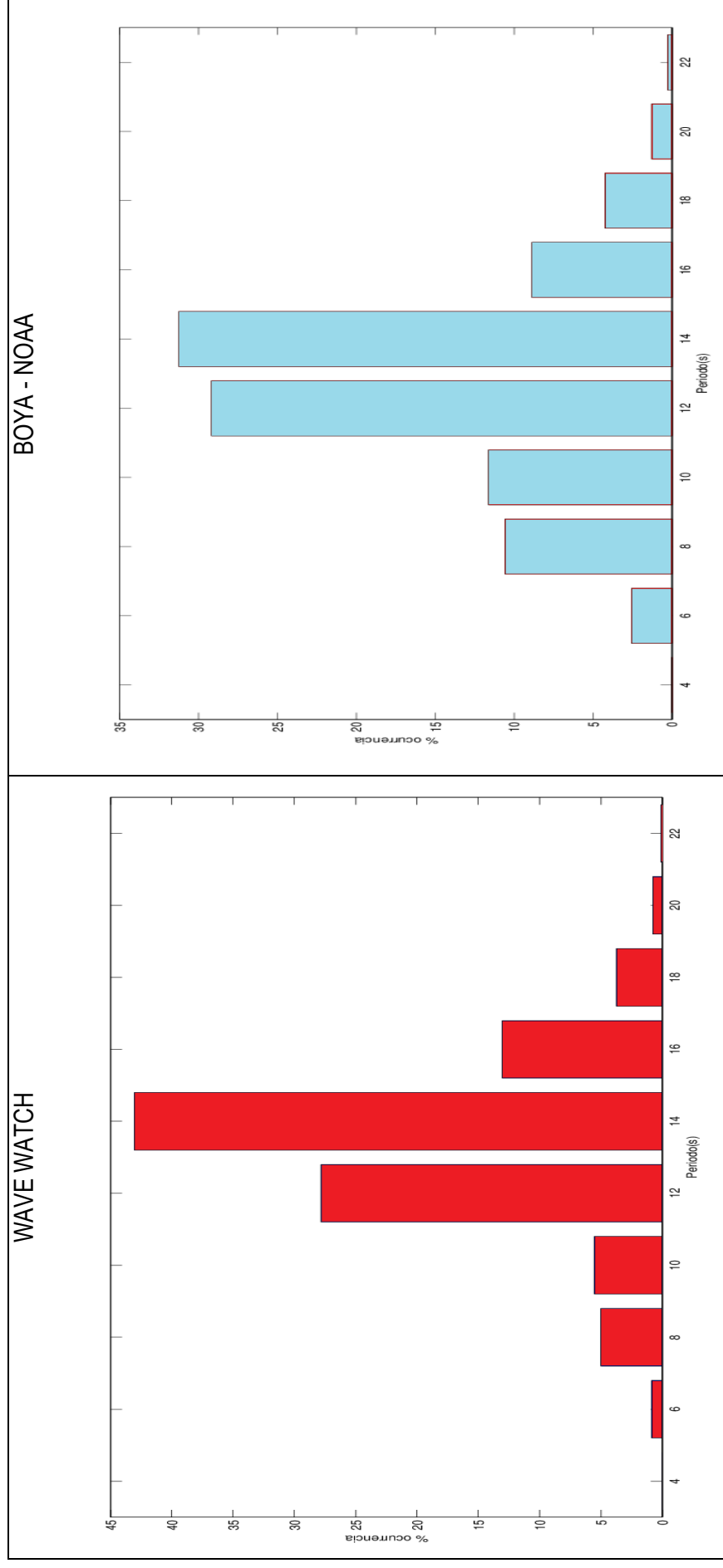


Figura 5.6. Comparación del histograma de altura de olas del modelo WAVE WATCH y los datos de la boya NOAA para el punto 19.5S - 85.5W



Fuente datos: (NOAA - WWATCH) y (NDBC - Boya 32012)

Figura 5.7. Comparación del periodo de olas del modelo WAVE WATCH y los datos de la boya NOAA para el punto 19.5S - 85.5W



Fuente datos: (NOAA - WWATCH) y (NDBC - Boya 32012)

Figura 5.8. Ubicación del punto de extracción de olas en aguas profundas.



Fuente: Google Earth

Por otro lado, en la Tabla 5.1, se observa el resultado de la clasificación de olas en forma descendente, de acuerdo a su frecuencia (%), periodo, altura y dirección, donde se aprecia en las 6 primeras filas que la mayor frecuencia de los casos presenta el oleaje que proviene del suroeste con un rango de periodo entre 11s y 19s, y con una altura aproximada entre 1.5 y 3.5m, lo que se representa aproximadamente 236 días del año.

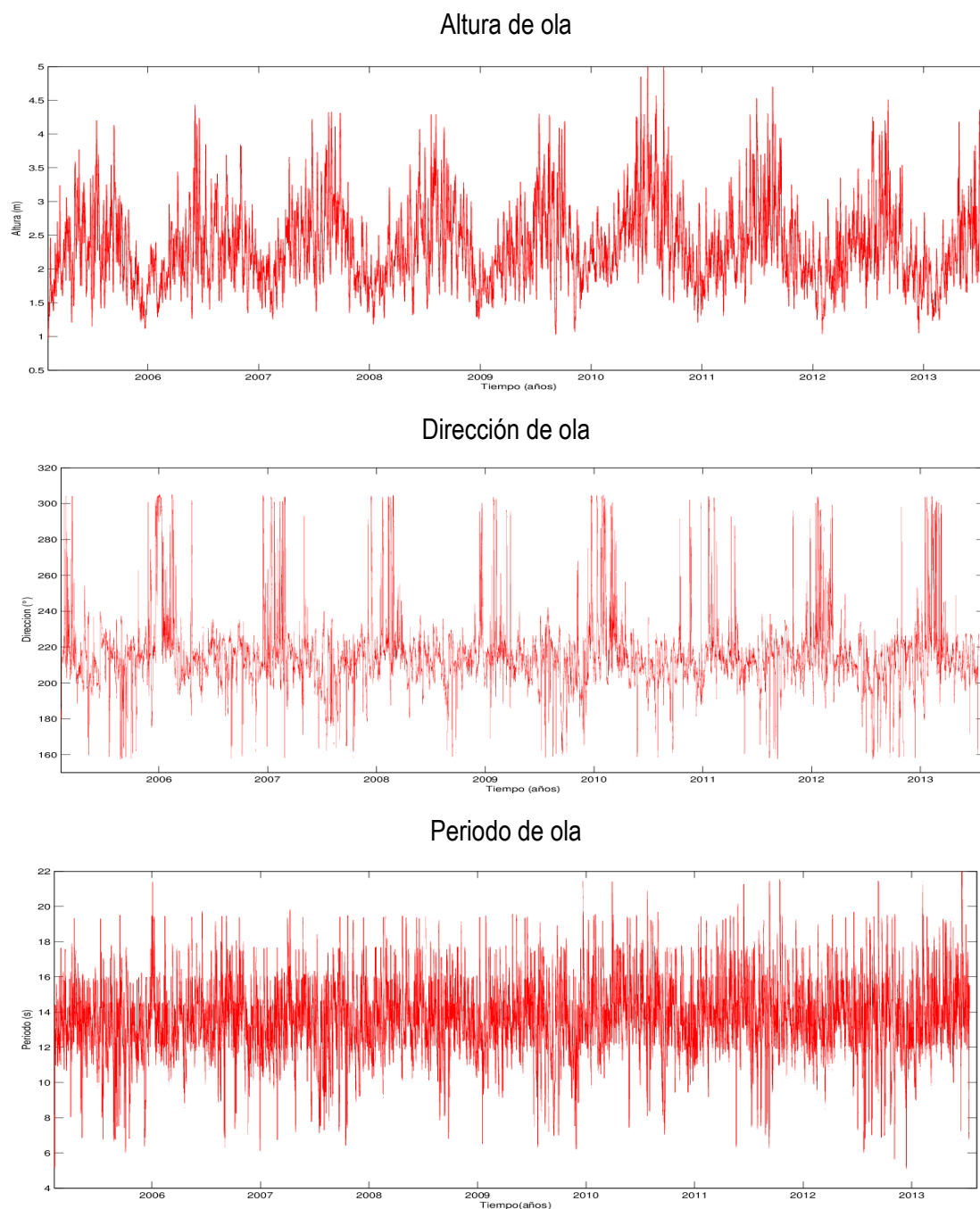
En función a los datos presentados en la, se han seleccionado los casos de propagación de oleaje hacia aguas costeras que se van a emplear, tomando en consideración lo siguiente:

- Según la morfología costera, las olas del Noroeste no influyen en la zona de estudio debido a que estas olas llegan muy refractadas y por lo tanto con mucha pérdida de energía.
- Las olas en su proceso de propagación hacia aguas poco profundas, conservan su periodo con respecto a aguas profundas.
- Se han considerado sólo el oleaje que proviene de las direcciones Sur, Suroeste y Oeste.

De esta manera, se han definido 105 casos de propagación de oleaje (Tabla 5.1), de los cuales solo se seleccionaron 79 casos (Tabla 5.2) correspondiente a la propagación de olas de

dirección Oeste, Suroeste y Sur que son las más predominantes y son presentados en la Tabla 5.1

Figura 5.9. Serie de tiempo de altura, dirección y periodo de olas en aguas profundas para el punto 80 W y 13.5 S, estimados según el modelo de olas oceánicas WW3.



Fuente datos: (NOAA - WWATCH)

Figura 5.10. Distribución de frecuencia de altura y periodo de olas en aguas profundas para el punto 80 W y 13.5 S, de acuerdo con los resultados del modelo de olas oceánicas WW3. Fuente de datos: NCEP-NOAA.

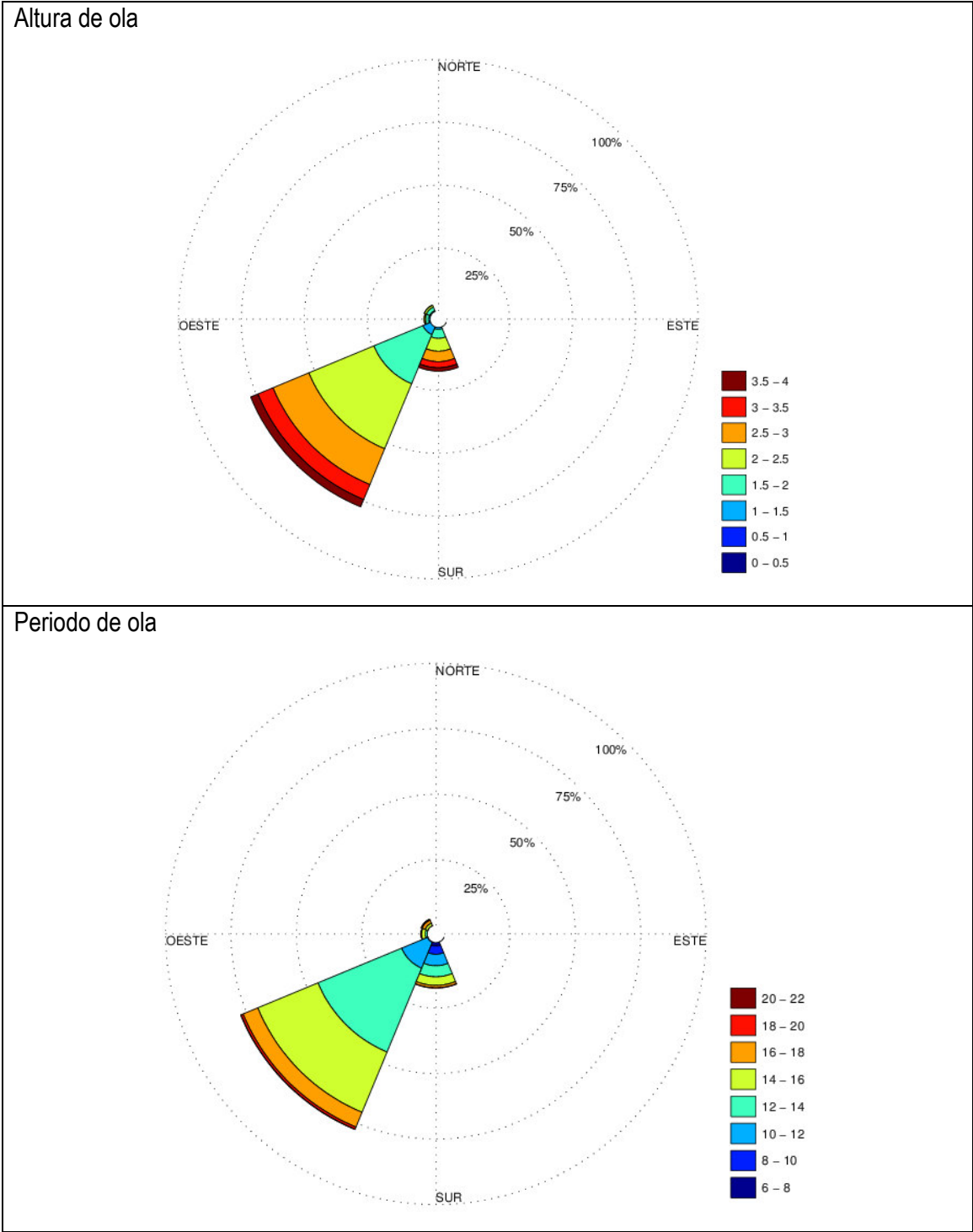




Tabla 5.1. Estimación de olas (80 W y 13.5 S) de acuerdo con los resultados reanálisis del modelo numérico WW3.

Nº	Tp (s)	Dir (°)	Hs (m)	%Oc anual	Días/año
1	13 - 15	225	2.5	21.92	79.99
2	11 - 13	225	2.5	10.46	38.18
3	15 - 17	225	2.5	9.75	35.59
4	11 - 13	225	1.5	6.71	24.48
5	15 - 17	225	3.5	4.61	16.83
6	13 - 15	225	3.5	4.49	16.37
7	13 - 15	225	1.5	4.16	15.17
8	17 - 19	225	2.5	2.7	9.84
9	11 - 13	180	2.5	2.7	9.87
10	13 - 15	180	2.5	2.22	8.1
11	15 - 17	315	2.5	1.79	6.54
12	9 - 11	180	2.5	1.69	6.18
13	15 - 17	270	2.5	1.47	5.35
14	15 - 17	315	1.5	1.44	5.27
15	15 - 17	225	1.5	1.42	5.18
16	13 - 15	180	3.5	1.4	5.11
17	7 - 9	180	2.5	1.19	4.35
18	17 - 19	225	3.5	1.16	4.22
19	13 - 15	270	1.5	1.15	4.21
20	17 - 19	315	2.5	1.12	4.09
21	15 - 17	180	2.5	1.01	3.69
22	15 - 17	180	3.5	0.96	3.5
23	13 - 15	270	2.5	0.9	3.27
24	11 - 13	225	3.5	0.87	3.16
25	11 - 13	180	3.5	0.69	2.53
26	13 - 15	315	1.5	0.68	2.49
27	9 - 11	180	3.5	0.67	2.45
28	7 - 9	135	3.5	0.67	2.44
29	15 - 17	225	4.5	0.66	2.4
30	19 - 21	225	2.5	0.64	2.33
31	9 - 11	225	1.5	0.63	2.29
32	9 - 11	180	1.5	0.62	2.27
33	11 - 13	180	1.5	0.56	2.04
34	17 - 19	315	1.5	0.52	1.89
35	15 - 17	270	1.5	0.47	1.72
36	19 - 21	315	2.5	0.38	1.37
37	7 - 9	135	2.5	0.35	1.27
38	7 - 9	180	3.5	0.34	1.24
39	13 - 15	225	4.5	0.32	1.15
40	17 - 19	225	1.5	0.31	1.13
41	17 - 19	180	2.5	0.28	1.01
42	17 - 19	180	3.5	0.27	0.98
43	17 - 19	225	4.5	0.26	0.95
44	13 - 15	180	1.5	0.26	0.95
45	9 - 11	225	2.5	0.23	0.83
46	7 - 9	180	1.5	0.23	0.83
47	19 - 21	315	1.5	0.2	0.74
48	19 - 21	225	3.5	0.19	0.71
49	17 - 19	270	2.5	0.19	0.69
50	13 - 15	315	2.5	0.19	0.69
51	9 - 11	180	4.5	0.15	0.56
52	5 - 7	135	2.5	0.13	0.47
53	15 - 17	180	4.5	0.13	0.48
54	13 - 15	180	4.5	0.13	0.48
55	15 - 17	180	1.5	0.12	0.45
56	11 - 13	270	1.5	0.12	0.42
57	15 - 17	270	3.5	0.08	0.29
58	9 - 11	135	4.5	0.07	0.25
59	5 - 7	180	2.5	0.07	0.26

Nº	Tp (s)	Dir (°)	Hs (m)	%Oc anual	Días/año
60	19 - 21	225	1.5	0.07	0.26
61	21 - 23	315	2.5	0.06	0.21
62	21 - 23	225	2.5	0.06	0.22
63	7 - 9	135	4.5	0.05	0.18
64	17 - 19	180	4.5	0.05	0.17
65	11 - 13	180	4.5	0.05	0.17
66	9 - 11	135	3.5	0.04	0.14
67	5 - 7	180	1.5	0.04	0.15
68	19 - 21	180	3.5	0.04	0.15
69	19 - 21	180	2.5	0.04	0.15
70	17 - 19	270	3.5	0.04	0.15
71	17 - 19	270	1.5	0.04	0.14
72	17 - 19	180	1.5	0.04	0.13
73	19 - 21	225	4.5	0.03	0.11
74	5 - 7	180	0.5	0.02	0.06
75	17 - 19	315	3.5	0.02	0.07
76	11 - 13	315	1.5	0.02	0.06
77	11 - 13	270	2.5	0.02	0.06
78	11 - 13	225	4.5	0.02	0.07
79	9 - 11	315	1.5	0.01	0.02
80	9 - 11	225	3.5	0.01	0.02
81	9 - 11	135	5.5	0.01	0.02
82	7 - 9	180	4.5	0.01	0.05
83	5 - 7	135	3.5	0.01	0.02
84	5 - 7	135	1.5	0.01	0.04
85	5 - 7	135	0.5	0.01	0.02
86	21 - 23	315	1.5	0.01	0.04
87	21 - 23	225	3.5	0.01	0.04
88	21 - 23	225	1.5	0.01	0.03
89	21 - 23	180	3.5	0.01	0.02
90	19 - 21	270	3.5	0.01	0.03
91	19 - 21	270	2.5	0.01	0.04
92	19 - 21	180	4.5	0.01	0.04
93	19 - 21	180	1.5	0.01	0.03
94	17 - 19	225	5.5	0.01	0.02
95	17 - 19	180	5.5	0.01	0.04
96	15 - 17	315	3.5	0.01	0.02
97	15 - 17	180	5.5	0.01	0.04
98	7 - 9	180	0.5	0	0
99	7 - 9	135	1.5	0	0.02
100	23 - 25	315	2.5	0	0.01
101	23 - 25	225	1.5	0	0.01
102	21 - 23	180	4.5	0	0
103	21 - 23	180	2.5	0	0.01
104	19 - 21	225	5.5	0	0.01
105	15 - 17	225	5.5	0	0

Fuente datos: (NOAA - WWATCH)

Tabla 5.2.-Casos de propagación de olas de aguas profundas a poco profundas en 80 Oeste y 13.5 Sur

Caso	Tp (s)	Dir (°)	Hs (m)	%Oc anual	Días/año
1	13 - 15	225	2.5	21.92	79.99
2	11 - 13	225	2.5	10.46	38.18
3	15 - 17	225	2.5	9.75	35.59
4	11 - 13	225	1.5	6.71	24.48
5	15 - 17	225	3.5	4.61	16.83
6	13 - 15	225	3.5	4.49	16.37
7	13 - 15	225	1.5	4.16	15.17
8	17 - 19	225	2.5	2.7	9.84
9	11 - 13	180	2.5	2.7	9.87
10	13 - 15	180	2.5	2.22	8.1
11	9 - 11	180	2.5	1.69	6.18
12	15 - 17	270	2.5	1.47	5.35
13	15 - 17	225	1.5	1.42	5.18
14	13 - 15	180	3.5	1.4	5.11
15	7 - 9	180	2.5	1.19	4.35
16	17 - 19	225	3.5	1.16	4.22
17	13 - 15	270	1.5	1.15	4.21
18	15 - 17	180	2.5	1.01	3.69
19	15 - 17	180	3.5	0.96	3.5
20	13 - 15	270	2.5	0.9	3.27
21	11 - 13	225	3.5	0.87	3.16
22	11 - 13	180	3.5	0.69	2.53
23	9 - 11	180	3.5	0.67	2.45
24	15 - 17	225	4.5	0.66	2.4
25	19 - 21	225	2.5	0.64	2.33
26	9 - 11	225	1.5	0.63	2.29
27	9 - 11	180	1.5	0.62	2.27
28	11 - 13	180	1.5	0.56	2.04
29	15 - 17	270	1.5	0.47	1.72
30	7 - 9	180	3.5	0.34	1.24
31	13 - 15	225	4.5	0.32	1.15
32	17 - 19	225	1.5	0.31	1.13
33	17 - 19	180	2.5	0.28	1.01
34	17 - 19	180	3.5	0.27	0.98
35	17 - 19	225	4.5	0.26	0.95
36	13 - 15	180	1.5	0.26	0.95
37	9 - 11	225	2.5	0.23	0.83
38	7 - 9	180	1.5	0.23	0.83
39	19 - 21	225	3.5	0.19	0.71
40	17 - 19	270	2.5	0.19	0.69
41	9 - 11	180	4.5	0.15	0.56
42	15 - 17	180	4.5	0.13	0.48
43	13 - 15	180	4.5	0.13	0.48
44	15 - 17	180	1.5	0.12	0.45
45	11 - 13	270	1.5	0.12	0.42

Caso	Tp (s)	Dir (°)	Hs (m)	%Oc anual	Días/año
46	15 - 17	270	3.5	0.08	0.29
47	5 - 7	180	2.5	0.07	0.26
48	19 - 21	225	1.5	0.07	0.26
49	21 - 23	225	2.5	0.06	0.22
50	17 - 19	180	4.5	0.05	0.17
51	11 - 13	180	4.5	0.05	0.17
52	5 - 7	180	1.5	0.04	0.15
53	19 - 21	180	3.5	0.04	0.15
54	19 - 21	180	2.5	0.04	0.15
55	17 - 19	270	3.5	0.04	0.15
56	17 - 19	270	1.5	0.04	0.14
57	17 - 19	180	1.5	0.04	0.13
58	19 - 21	225	4.5	0.03	0.11
59	5 - 7	180	0.5	0.02	0.06
60	11 - 13	270	2.5	0.02	0.06
61	11 - 13	225	4.5	0.02	0.07
62	9 - 11	225	3.5	0.01	0.02
63	7 - 9	180	4.5	0.01	0.05
64	21 - 23	225	3.5	0.01	0.04
65	21 - 23	225	1.5	0.01	0.03
66	21 - 23	180	3.5	0.01	0.02
67	19 - 21	270	3.5	0.01	0.03
68	19 - 21	270	2.5	0.01	0.04
69	19 - 21	180	4.5	0.01	0.04
70	19 - 21	180	1.5	0.01	0.03
71	17 - 19	225	5.5	0.01	0.02
72	17 - 19	180	5.5	0.01	0.04
73	15 - 17	180	5.5	0.01	0.04
74	7 - 9	180	0.5	0	0
75	23 - 25	225	1.5	0	0.01
76	21 - 23	180	4.5	0	0
77	21 - 23	180	2.5	0	0.01
78	19 - 21	225	5.5	0	0.01
79	15 - 17	225	5.5	0	0

Fuente datos: (NOAA - WWATCH)

## CAPITULO VI

### VI. MODELACION NUMERICA

#### 6.1. Modelo empleado

El modelo numérico de olas empleado en el presente estudio es el modelo REFDIF, que es un acrónimo para la combinación de REFraccion /DIFraccion, el cual fue desarrollado en la Universidad de Delaware en Estados Unidos por James T. Kirby, Robert A. Dalrymple y Fengyan Shi en año 1982. Este modelo puede ser descargado libremente a través de la página web:

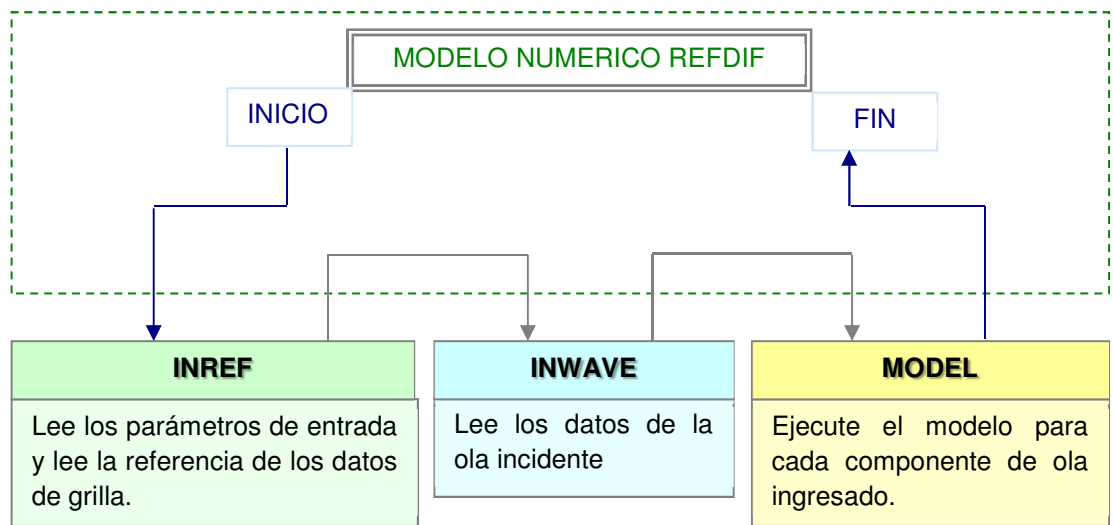
<http://chinacat.coastal.udel.edu/kirby/programas/refdif/refdif.html>

El código fuente del modelo y las 14 subrutinas están desarrollados en el lenguaje de programación FORTRAN, y puede ser compilado en cualquier sistema operativo que contenga el FORTRAN. Para el desarrollo de las simulaciones numéricas de la tesis se ha utilizado el sistema operativo LINUX – UBUNTU y WINDOWS.

El modelo REFDIF, abarca muchos procesos físicos como de refracción, difracción y disipación de energía, los cuales son aplicados en el desarrollo de la tesis, debido a la configuración que presenta la bahía de Miraflores, el cual involucra la modelación de las olas en una región con batimetría irregular y con la presencia de islas cercanas a la zona de estudio.

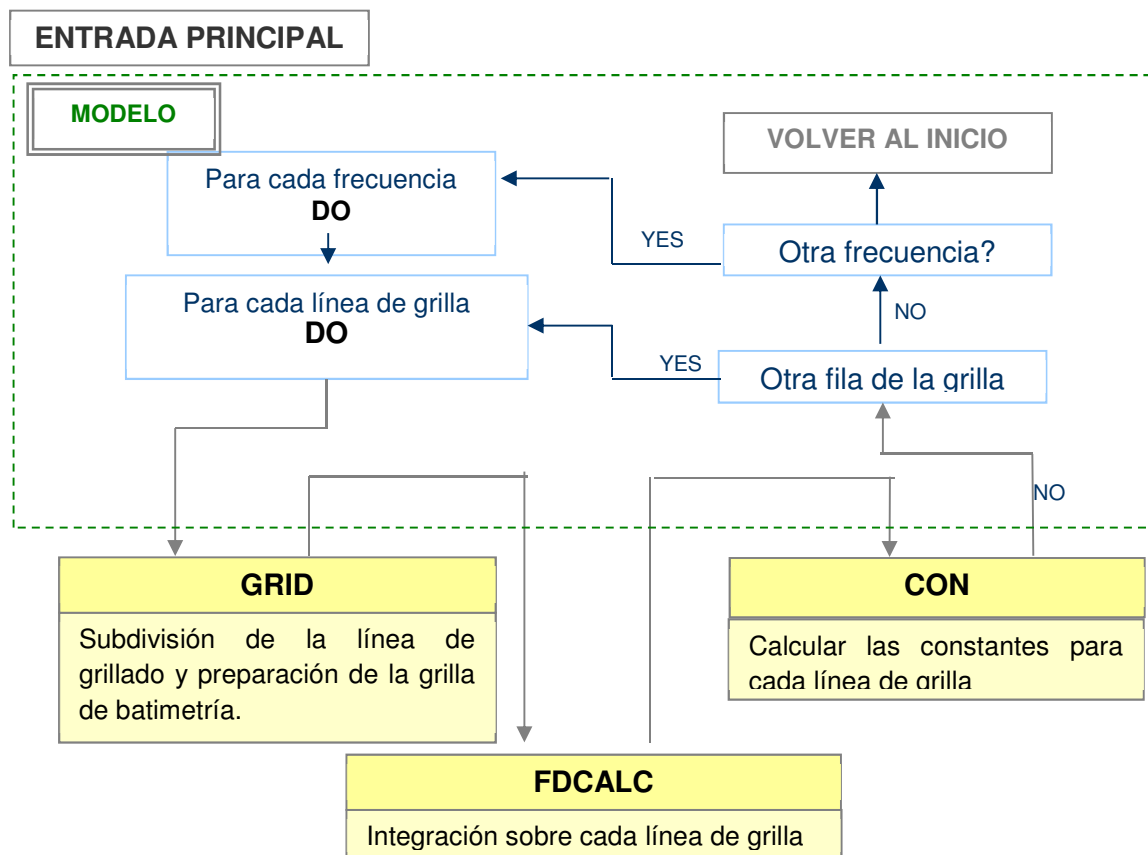
El modelo REFDIF está estructurado en dos niveles, un nivel principal (entrada de datos) y el segundo nivel que comprende la ejecución del mismo modelo, que realiza el cálculo de diferencias finitas. Los diagramas de flujo para los dos niveles se observan en la Figura 6.1 y Figura 6.2 (James/REFDIF, 1994)

Figura 6.1. Estructura del modelo numérico REFDIF.



Fuente: (James/REFDIF, 1994)

Figura 6.2. Subrutinas del Modelo numérico REFDIF.



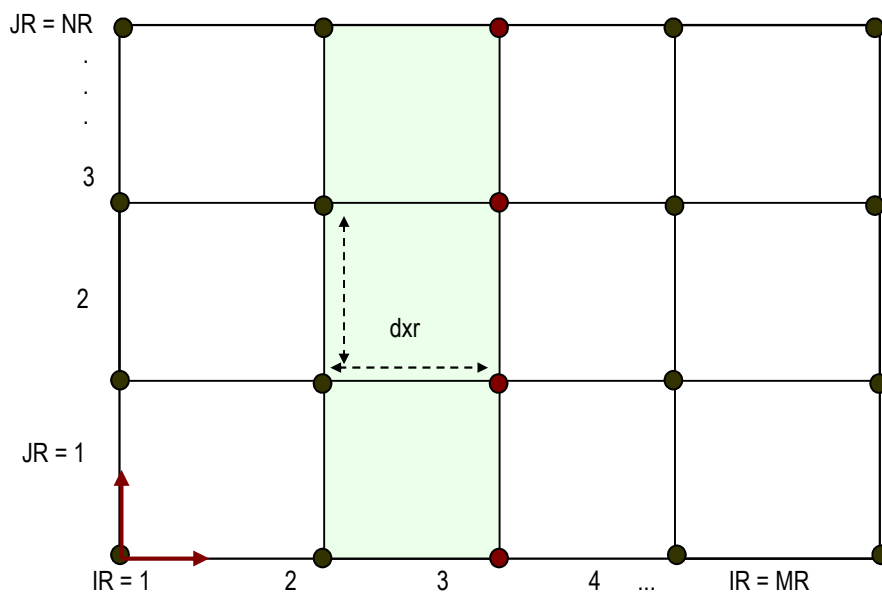
Fuente: (James/REFDIF, 1994)

## 6.2. Grilla Usada en el Modelo

El grillado (Figura 6.3), consiste en una malla de puntos, con dimensiones en el eje **X** [1,MR] y eje **Y** [1,NR], los cuales se ubican de manera permanente en el programa param.h, con un espaciado en X y Y denominado **dxr** y **dxy**.

Los datos de profundidad y las componentes de corrientes (ur,vr) son definidos en los puntos de grilla, estableciéndose como punto de inicio de grilla (IR,JR) =(1,1).

Figura 6.3. Grillado usado por el modelo REFDIF.

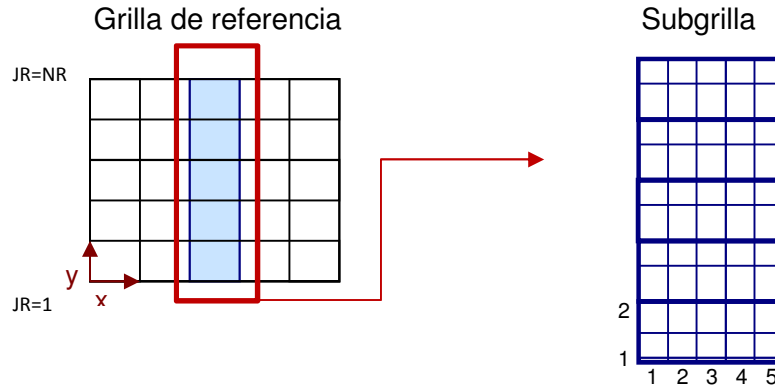


Fuente: (James/REFDIF, 1994)

### Subgrilla

El modelo permite trabajar con sub-grillas (Figura 6.4) a fin de mejorar la resolución en áreas de mayor interés, las cuales pueden ser especificadas por el usuario, esta subdivisión permite hacer cálculos más finos en áreas donde se tenga mayor interés.

Figura 6.4. Subgrilla usada en el modelo REFDIF



Fuente: (James/REFDIF, 1994)

### 6.3. Características del modelo REFDIF

El modelo de REFDIF es basado en la expansión de Stokes, así mismo, utiliza una aproximación parabólica, la cual restringe el modelado a áreas donde la dirección de la propagación de ola está dentro de  $\pm 70^\circ$  para la dirección de ola asumida, y el uso de las técnicas de diferencias finitas para la amplitud de una ola, el cual resulta en matrices tridiagonales, el cual son computacionalmente muy fácil de invertir.

Algunas características del modelo:

#### 6.3.1. Ecuación de pendiente suave

El problema de la propagación de olas marinas sobre una batimetría irregular en direcciones arbitrarias es un problema tridimensional e involucra condiciones de frontera complicadas que no son lineales (James/REFDIF, 1994). La ecuación utilizada por el modelo, para lo cual se refiere al operador de pendiente horizontal es:

$$\nabla_h \cdot (CC_g \nabla_h \eta) + \sigma^2 \frac{C_g}{C} \eta = 0 \quad \dots(6.1)$$

donde

$$C = \sqrt{\frac{g}{k} \tanh(kh)} \quad \dots(6.2)$$

Celeridad de la ola

$$C_g = \frac{C \left[ 1 + \frac{2kh}{\sinh(2kh)} \right]}{2} \quad \dots(6.3)$$

Celeridad de grupo

Donde las profundidades locales  $h(x, y)$  y  $g$  es la aceleración de la gravedad. El número de onda es  $k(x, y)$ , está relacionado a la frecuencia angular de la ola  $\sigma$  y a la profundidad del agua  $h$ , por la **relación de dispersión lineal**. (James/REFDIF, 1994)

$$\sigma^2 = gk \cdot \tanh(kh) \quad \dots(6.4)$$

### 6.3.2. Modelo de difracción

Mei y Tuck (1980) desarrolló una ecuación parabólica simple para la difracción de las olas (James/REFDIF, 1994). Su ecuación es:

$$\frac{\partial A}{\partial x} = \frac{i}{2k} \frac{\partial^2 A}{\partial y^2} \quad \dots(6.5)$$

Donde  $A$  es una amplitud compleja relacionada a la superficie del agua desplazada por :

$$\eta = A e^{i(kx - \sigma t)} \quad \dots(6.6)$$

### 6.3.3. Consideraciones

El modelo REF/DIF 1, tiene varias consideraciones, las cuales se detallan a continuación:

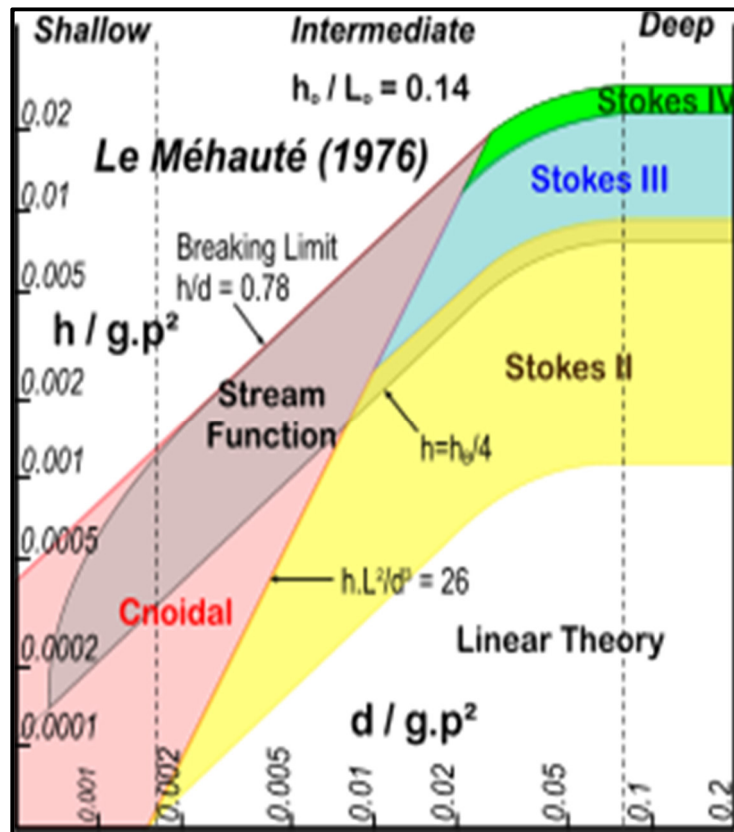
- a. Fondo de pendiente suave. La derivación matemática de las ecuaciones del modelo asume que las variaciones en el fondo ocurren sobre distancias las cuales son largas en comparación a la longitud de onda. Para el modelo lineal Booij (1983) realizó una comparación entre el modelo numérico exacto y el modelo de pendiente suave para olas de “poca profundidad” en una playa, encontrando que para el fondo suave 1:3 el modelo de pendiente suave era exacto y para pendientes fuertes se logró predecir las variaciones de las tendencias de altura de la ola y los coeficientes de la reflexión correctamente. (James/REFDIF, 1994).

- b. Consideración de términos no lineales débiles. Estrictamente, el modelo es basado en la perturbación de expansión de Stokes y es por consiguiente restringido para aplicaciones dónde las olas de Stokes son válidas (James/REFDIF, 1994). Una medida de no linealidad es el parámetro de Ursell:

$$U = \frac{HL^2}{h^3} \quad \dots(6.7)$$

Donde H: amplitud de la ola

Figura 6.5. Rango de validez de las diferentes teorías de oleaje



Fuente: (Le Méhauté, 1976)

Cuando este parámetro excede de 40, la solución de Stokes ya no es válida. Para proporcionar un modelo que es válido para aguas poco profundas (razas), una relación de dispersión heurística desarrollada por (Hedges, 1976) es proporcionado como una opción en el modelo (James/REFDIF, 1994). Esta relación entre la frecuencia y la profundidad del agua es:



$$\sigma^2 = gk \cdot \tanh\left(kh \left(1 + \frac{|A|}{h}\right)\right) \quad \dots(6.8)$$

c. En aguas poco profundas, esta ecuación representa una ola solitaria, mientras que en aguas profundas, asintóticamente se acerca al resultado de ola lineal, despreciando los efectos reales de amplitud dispersiva. Por esta razón REFDIF utiliza la relación de Hedges (aguas poco profundas) y la relación de Stokes (en aguas profundas). Como resultado de ello, hay tres posibles opciones para la elección de la relación de dispersión a considerar en el REFDIF (James/REFDIF, 1994):

- i. Modelo lineal.
- ii. Modelo no lineal Stokes – Hedges
- iii. Modelo de Stokes

d. La dirección de la ola se confina a un sector  $\pm 70^\circ$  de la dirección principal de ola, ambos son usados para un ancho mínimo y máximo del ángulo de aproximación parabólica de Kirby (1986b) (James/REFDIF, 1994).

#### 6.3.4. Disipación de Energía

La dispersión de energía en el modelo ocurre de varias maneras que dependen de la situación que se desea modelar. Para tratar las pérdidas friccionales de fondo debido a los fondos ásperos, porosos o viscosos, películas de la superficie, y ruptura de la ola (James/REFDIF, 1994). La forma lineal de la ecuación de pendiente suave con disipación es:

$$\frac{\partial A}{\partial x} = \frac{i}{k} \frac{\partial^2 A}{\partial y^2} + wA \quad \dots(6.9)$$

$w$  Disipación de Energía dividida por la energía. Unidad [tiempo]

El modelo parametriza la disipación de energía ( $w$ ) teniendo en cuenta lo siguiente:

- Superficie laminar y capa límite de fondo

$$w = \frac{2\sigma\kappa\sqrt{\left(\frac{\nu}{2\sigma}\right)}(1-i)}{\sinh 2kh} \quad \dots(6.10)$$

- Capa límite de fondo turbulento

$$w = \frac{2\sigma k f |A| (1-i)}{3\pi (\sinh(2kh)) (\sin(kh))} \dots (6.11)$$

- Arena porosa

$$w = \frac{gkC_p (1-i)}{\cosh^2 kh} \dots (6.12)$$

- Rompiente de ola

$$w = \frac{K.C_g \left( 1 - \left( \frac{\eta}{H} \right)^2 \right)}{h} \dots (6.13)$$

Donde:

$\nu$  : Viscosidad Cinemática

$\sigma$  : Relación de dispersión

$k$  : Número de ola

$f$  : Parámetro de amortiguación =0.01 (Dean et al, 1984)

$C_p$  : Coeficiente de permeabilidad =  $4.5 \times 10^{-11}$  m<sup>2</sup> ( (Liu et al, 1984))

$h$  : Profundidad

$K=0.017$  y  $\gamma=0.4$  : Constantes empiricas( (Dally et al, 1985))

$H = 2|A|$

$C_g$  : Celeridad de grupo

### 6.3.5. Desarrollo Numérico

El modelo REFDIF, usa el método de Crank Nicolson para resolver ecuaciones diferenciales parciales por diferencias finitas (James/REFDIF, 1994).

En el área de estudio la batimetría debe ser considerada dividida en rectángulos de  $\Delta x$  y  $\Delta y$ . La amplitud  $A(x, y)$  en cada punto de la malla, donde:

$$x = (i - 1)\Delta x \quad \dots(6. 14)$$

$$y = (j - 1)\Delta y \quad \dots(6. 15)$$

Ahora tenemos que determinar los valores de  $A(i, j)$  para un  $i=1, m$ , y  $j=1, n$ .

$$\frac{\partial A}{\partial x} = \frac{A_{i+1, j} - A_{i, j}}{\Delta x} \quad \dots(6. 16)$$

Luego, el esquema final utilizado por Crank Nicolson es (James/REFDIF, 1994).:

$$aA_{i+1, k+1} + bA_{i+1, j} + cA_{i+1, j-1} = dA_{i, j+1} + eA_{i, j} + fA_{i, j-1} \quad \dots(6. 17)$$

#### 6.3.6. Datos necesarios para inicializar el modelo de olas REFDIF

Los datos necesario que serán usados por el modelo REFDIF inicialmente son:

- Las características de las olas en las fronteras de entrada: período, dirección y altura de las olas.
- Las características de la malla de diferencias finitas (longitud de espaciamiento entre nodos,  $\Delta x$  y  $\Delta y$ ).
- Batimetría y perfil de costa de la zona de estudio.
- Nivel de la marea en el área de estudio.

Archivos que utiliza el modelo de olas REFDIF se muestran en el Anexo I y se describen a continuación:

- REFDAT.DAT: contiene la batimetría en cada punto de la malla.
- INDAT.DAT: contiene información general de la malla (número de divisiones de malla, la distancia entre los puntos de malla, sub-divisiones a considerar), período, altura y dirección de las olas, las condiciones del modelo entre otros.
- PARAM.H: contiene información sobre el tamaño de los vectores y matrices que se utilizarán en el programa.

### 6.3.7. Datos de salida del modelo de olas REFDIF

El modelo calcula la altura de la ola ( $H$ ), dirección de la ola ( $\theta$ ) y la elevación de la superficie ( $\eta$ ) en cada punto de la malla de diferencias finitas.

- OUTDAT.DAT: Valores de la altura de las olas y la dirección en cada punto de la malla.
- OWAVE.DAT: Valor de amplitud complejos en la última línea de malla (si IOUTPUT = 2);
- SURFACE.DAT: Valor de la superficie libre en cada punto de la malla.
- BOTTOMU.DAT: Magnitud de la velocidad de fondo en cada punto de la malla.
- ANGLE.DAT: dirección de la ola en cada punto de malla.
- REFDIF1.LOG: Información general de los datos y errores que pueda generar el modelo, etc.
- HEIGHT.DAT: Altura de la ola en cada punto de malla.
- SXX.DAT: Tensor de radiación  $S_{xx}$  en cada punto de malla.
- SXY.DAT: Tensor de radiación  $S_{xy}$  en cada punto de malla.
- SYX.DAT: Tensor de radiación  $S_{yx}$  en cada punto de malla.
- SYY.DAT: Tensor de radiación  $S_{yy}$  en cada punto de malla.
- DEPTH.DAT: profundidades (corregida por la suma de nivel de la marea), en cada punto del bucle.

### 6.3.8. Ventajas y desventajas

#### Ventajas

- a Realiza el cálculo de refracción de olas, rompiente de ola y “poca profundidad” en una batimetría realista.
- b Realiza interacciones corriente-olas.
- c Código fuente disponible.

#### Desventajas

- a. No representa el fenómeno de reflexión de ola.
- b. La dirección de la propagación de la ola se ve restringida a  $\pm 70^\circ$  para la dirección de ola asumida, debido al uso de una aproximación parabólica.

## 6.4. Aplicación del modelo REFDIF a casos de teóricos

A fin de que el modelo simule los efectos de refracción y difracción. A fin de verificar y validar las bases conceptuales existentes en la literatura respecto a la refracción y difracción de olas, con los resultados del modelo REFDIF, se diseñaron algunos casos de batimetrías, rompeolas y costas ideales, para comparar las tendencias que habría entre la literatura (teoría) y lo que representa la modelación numérica (REFDIF). (Hughes, 1993)

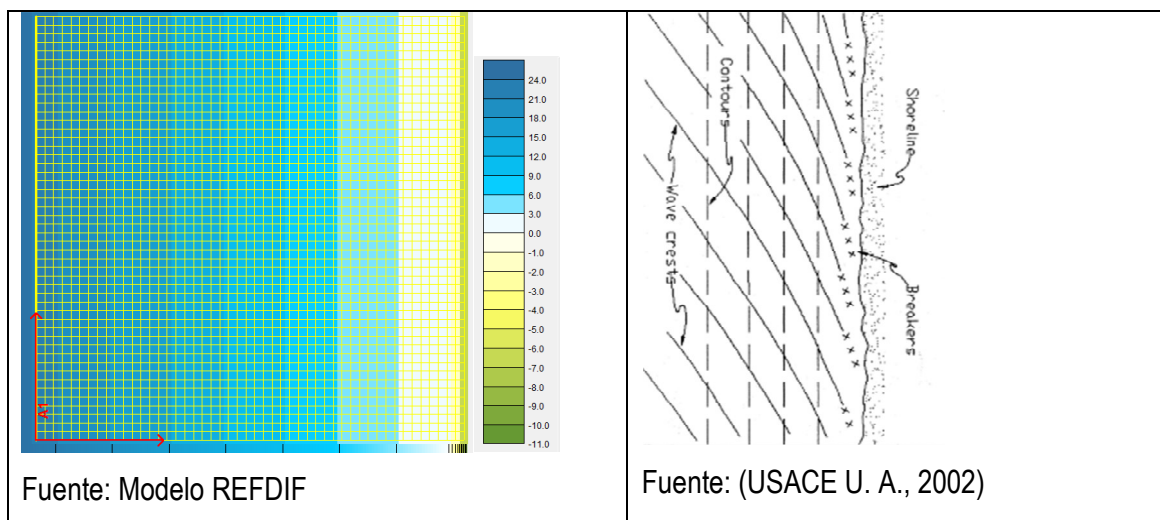
### 6.4.1. Casos Teóricos

#### 6.4.1.1. Diseño de una batimetría plana y de pendiente suave

Para el diseño de la batimetría se construyó una grilla rectangular de 50x50 puntos de grillas y un espaciado  $dx=18m$  &  $dy=18m$ .

Según la teoría, se muestra que si se tiene una batimetría de pendiente suave y paralelo a costa y se propaga la ola desde dirección Suroeste, se muestra que el tren de olas tiende a tener la misma dirección suroeste. Figura 6.6

Figura 6.6. Batimetría plana con pendiente suave

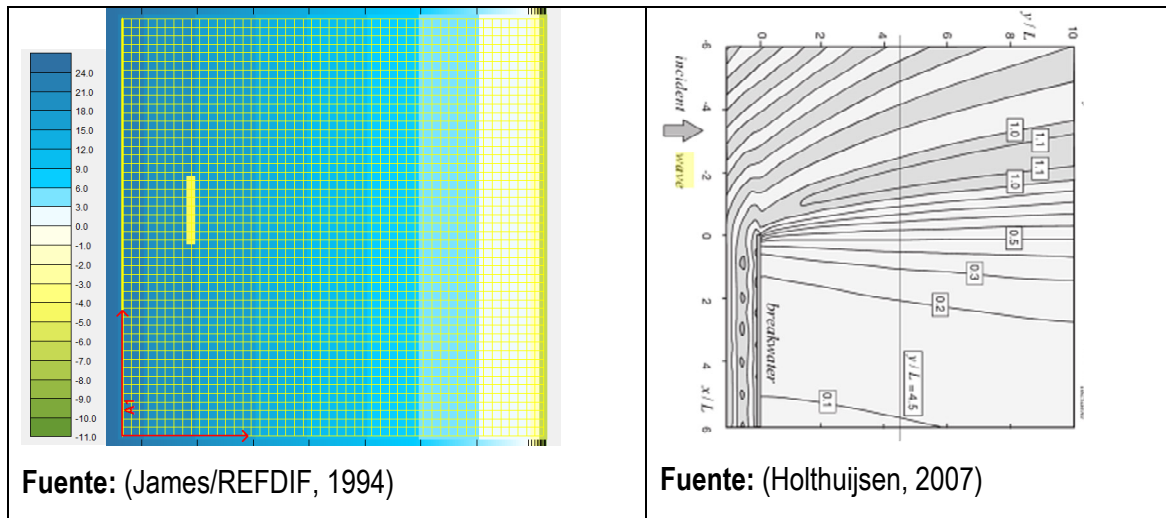


#### 6.4.1.2. Diseño de una batimetría plana con pendiente suave y un rompeolas

Bajo las mismas condiciones batimétricas modeladas anteriormente, se procedió a ingresar un rompeolas de 160m de largo paralelo a costa.

Cuando la ola viene de dirección Oeste y encuentra una barrera, se produce un proceso de difracción, por lo que el frente de ola pasa la barrera y adopta una forma circular, entrando en una zona de calma por detrás de la barrera, disminuyendo su altura en esa zona. Figura 6.7.

Figura 6.7. Batimetría plana con pendiente suave y un rompeolas

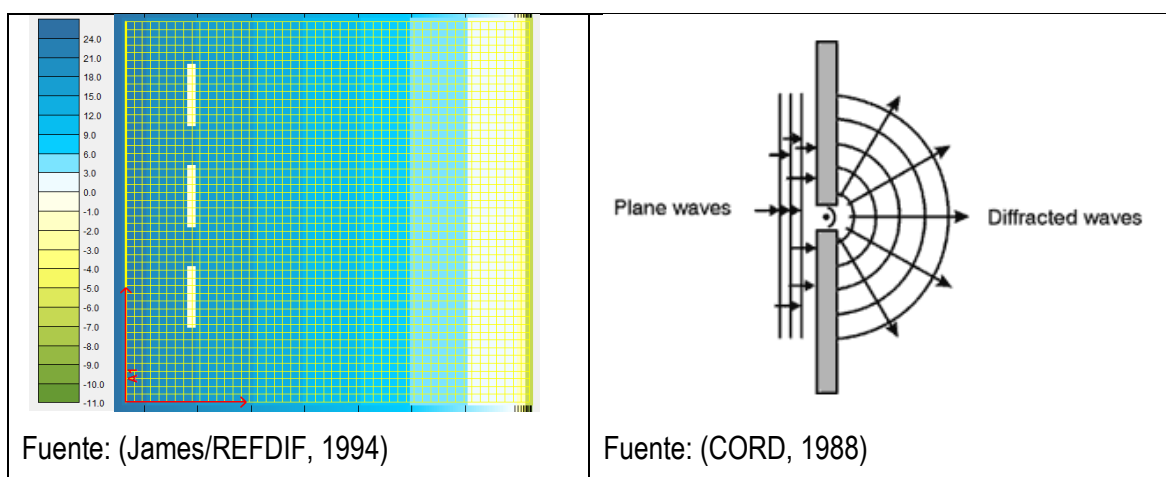


#### 6.4.1.3. Diseño de una batimetría plana de pendiente suave con tres rompeolas

Bajo las mismas condiciones batimétricas modeladas en el caso 01, se procedió a ingresar 3 rompeolas de 135m de largo paralelo a costa y con un espaciado de 75m entre cada una.

Se observa que entre 2 espigones, el tren de olas de dirección Oeste llega a pasar casi sin alterarse, y detrás de las estructuras se observa que estas tienen a tener una forma circular, presentándose alturas de olas menores detrás de las estructuras (Difracción). Figura 6.8.

Figura 6.8. Batimetría plana con pendiente suave y 3 rompeolas

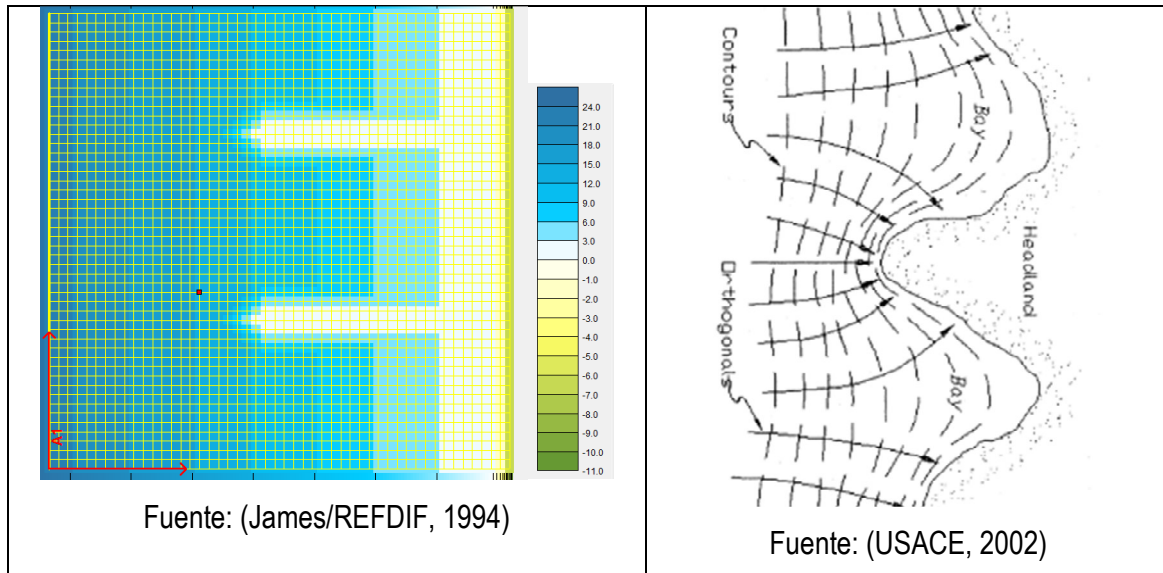


#### 6.4.1.4. Diseño con una batimetría con 2 lomas submarinas

Bajo las mismas condiciones batimétricas modeladas en el caso 01, se procedió a ingresar 2 lomas submarinas que salen de costa.

Según la literatura se tiene que cuando se presentan 2 lomas submarinas y/o puntas que sobresalen, la batimetría tiende a tener una configuración muy parecida al de la costa, observándose que para este caso, las olas tienden a juntarse en la punta, lo que indicaría una mayor concentración de energía en esa zona. Figura 6.9

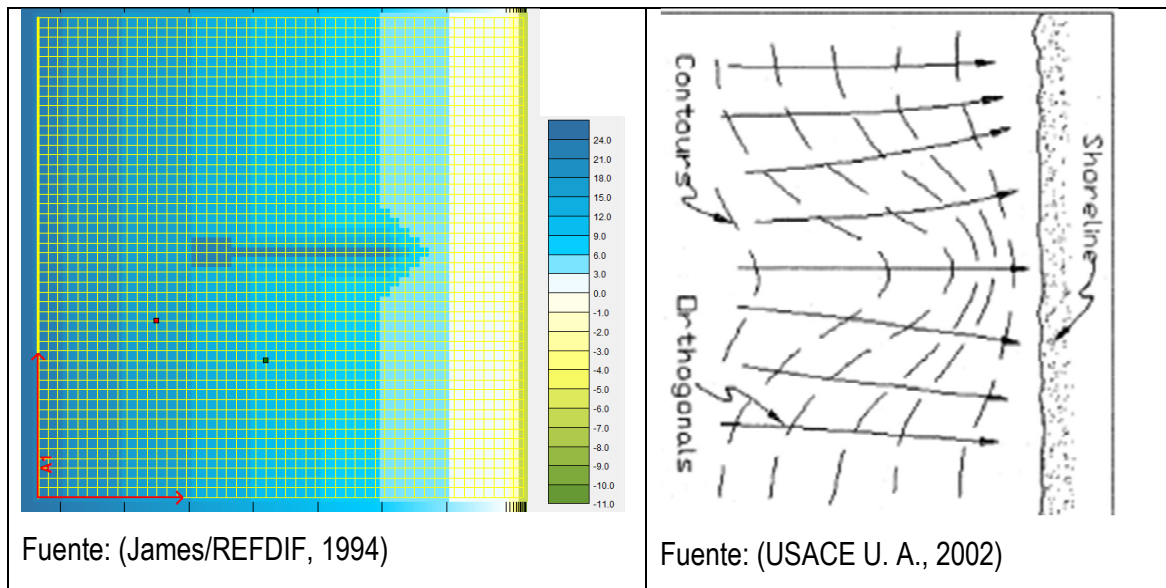
Figura 6.9. Batimetría con 2 lomas submarinas



#### 6.4.1.5. Diseño con una batimetría con 1 depresión cercana a costa

Bajo las mismas condiciones batimétricas modeladas en el caso 01, se procedió a ingresar 1 depresión de profundidades. Según la literatura, se tiene que cuando se presenta una zona de mayor profundidad, con veriles de profundidad que siguen esta misma forma. Así mismo, las olas tienen a dirigirse hacia afuera de la zona de depresión, indicándonos que la batimetría es un factor importante en la dirección de las olas Figura 6.10.

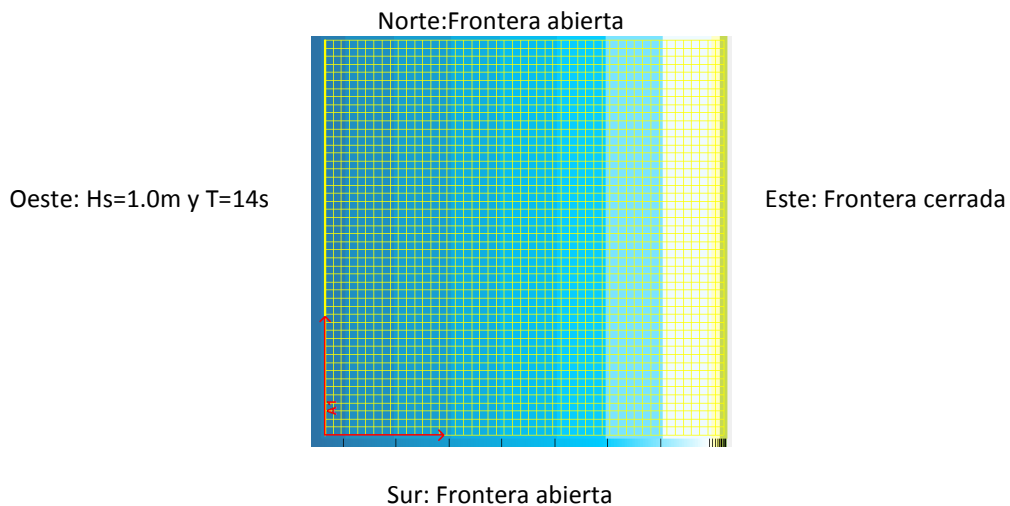
Figura 6.10. Batimetría con 1 depresión cercana a costas



#### 6.4.2. Condición de frontera

Las condiciones de frontera consideradas para cada caso se muestran a continuación:

Figura 6.11. Condición de frontera para la modelación



Norte y Sur.- Se considera una frontera abierta.

Este.- Ya que la costa se encuentra al este de cada caso, se considera una frontera cerrada.

Oeste.- Frontera abierta y se considera una altura de olas  $H_s=1.0\text{m}$ ,  $T=14\text{s}$  para 3 direcciones de propagación (Noroeste, Oeste y Suroeste).



## 6.5. Modelación de propagación de olas en la Bahía de Miraflores

Para el estudio se toman en cuenta las siguientes consideraciones:

- Flujo es incompresible ( $\rho=\text{constante}$ ).
- El flujo llega desde las fronteras y es puesto en movimiento por la influencia del oleaje en aguas profundas.
- El efecto de Coriolis debido a la rotación de la tierra es despreciado.
- El flujo es ideal (viscosidad es despreciable), por tanto no existen esfuerzos de corte en la interfase océano atmósfera o en el fondo. La velocidad potencial debe existir y satisfacer la ecuación de Laplace.
- Durante la modelación no existe interacción de las olas con algún otro fenómeno químico.

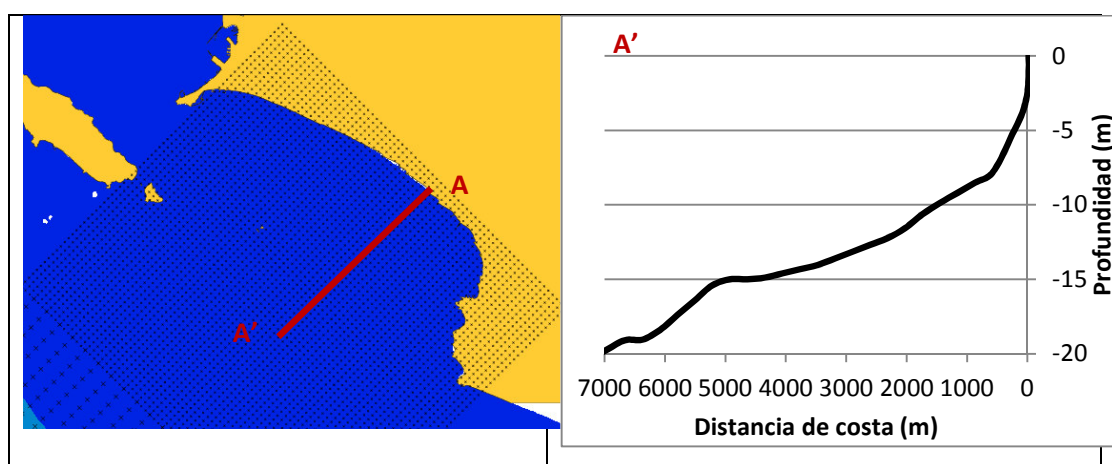
### 6.5.1 Validez de la teoría de olas (REFDIF) para la bahía de Miraflores

Para que el modelo REFDF sea aplicable a la bahía de Miraflores, debe cumplir lo siguiente:

- **Pendiente suave**

De acuerdo a la información batimétrica (HIDRONAV) se tiene que la bahía de Miraflores (para la sección de grilla tomada) tiene una pendiente suave ( $20/7000=0.0028$ ), por lo cual el modelo REFDF puede ser usado. Figura 6.12

Figura 6.12. Sección batimétrica para el cálculo de pendiente



Fuente: Propia

- **Teoría de olas de Stokes.**

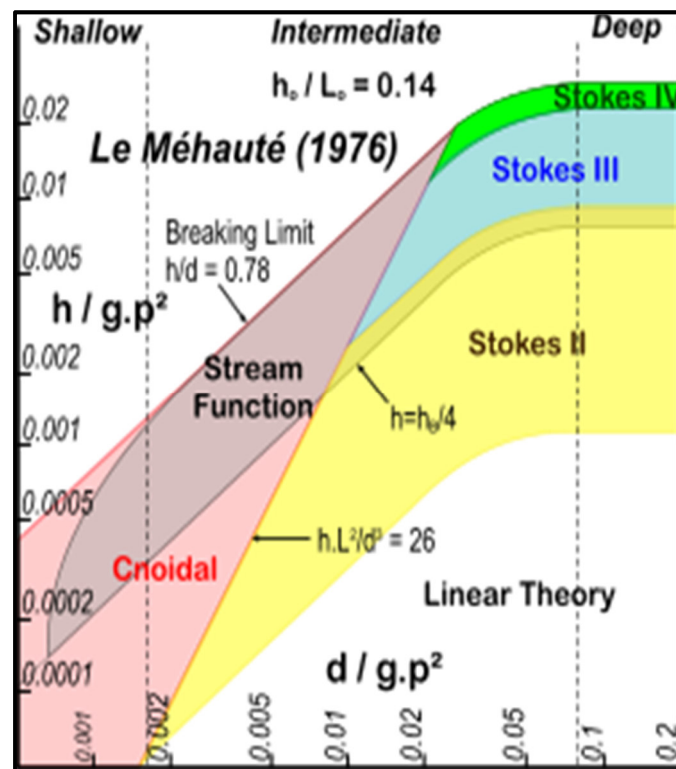
Para que el modelo sea aplicable a la bahía de Miraflores, debe cumplir con la teoría de Stokes (Figura 6.13), para esto se ha calculado:

$$H/(gt^2)=2.5/(9.81*14^2)=0.0013$$

$$d/(gt^2)=100/(9.81*14^2)=0.05$$

Lo cual corresponde a la teoría de Stokes II.

Figura 6.13. Diagrama de tipos de olas



Fuente: <http://www.calqlata.com/productpages/00020-help.html>

### 6.5.2. Grilla de Cálculo

Se realizó una interpolación de los datos de batimetría, con un espaciamento constante tanto en el eje X y Y, la misma que fue realizada con un programa en Fortran. Esta malla grillada, será la base batimétrica sobre la cual se realizan todos los cálculos posteriores.

En función a la estadística de olas extraídas en aguas profundas (Tabla 5.2) se procedió a diseñar el sistema de referencia adecuado y grillas de cálculo para la simulación óptima de las olas que se aproximan desde el Oeste, Suroeste y Sur.

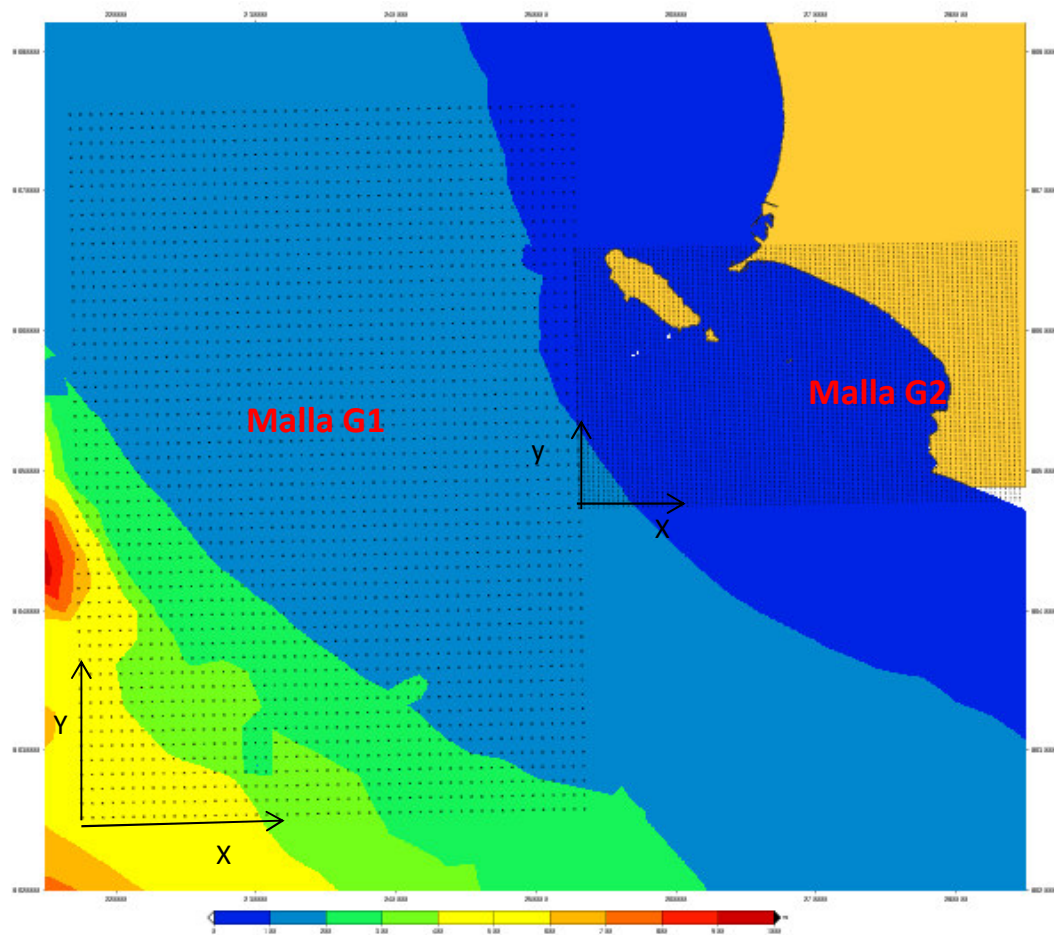
Para fines de dar una mejor resolución de información a la bahía de Miraflores, se definió una grilla principal en aguas profundas e intermedias, y se ejecutó el modelo REFDIF, posteriormente, se diseñó otra grilla de detalle (en la bahía de Miraflores) que tuvo como condición de frontera los resultados de la grilla principal y se ejecutó otra vez el modelo REFDIF. Este proceso, permitirá representar un anidamiento de mallas con una alta resolución de la información de olas en la bahía de Miraflores.

Para el caso de la simulación de las olas que se aproximan desde el Oeste se utilizaron las mallas G1 y G2, mientras que para las olas que se aproximan desde el Suroeste se utilizaron las mallas A1 y A2, y para las que se aproximan desde el Sur, se utilizó las mallas C1 y C2, cuyas características se muestran a continuación:

Tarea 6.1. Características de la grilla de cálculo empleadas en la modelación

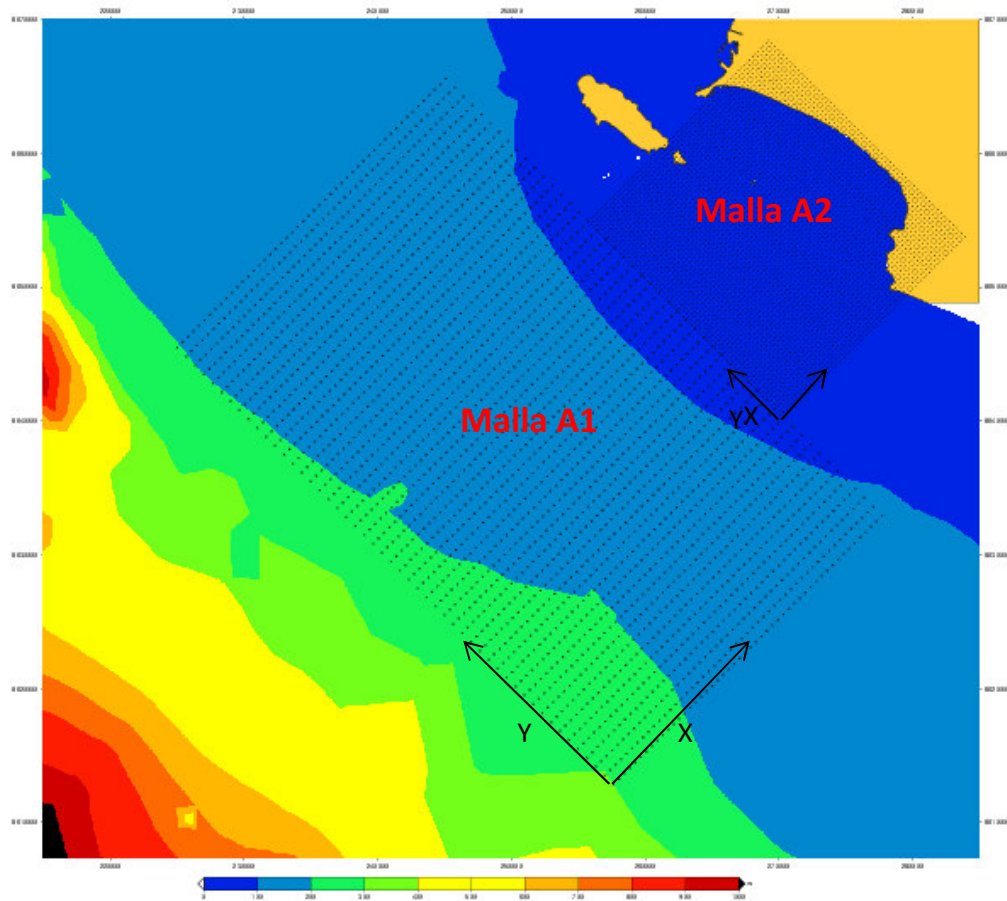
Malla de calculo	Detalle	Nx	Ny	$\Delta X$ (m)	$\Delta Y$ (m)	Angulo	Descripción
G1	Malla para aguas profundas	50	50	732	1026	1	Malla para propagar las estadísticas de olas de dirección Oeste
G2	Malla anidada de detalle	91	91	350	205	1	
C1	Malla para aguas profundas	50	150	757	574	90	Malla para propagar las estadísticas de olas de dirección Sur
C2	Malla anidada de detalle	150	85	102	191	90	
A1	Malla para aguas profundas	50	50	580	942	45	Malla para propagar las estadísticas de olas de dirección Suroeste
A2	Malla anidada de detalle	67	67	290	314	45	

Figura 6.14. Sistema de referencia y grilla de cálculo para las olas que se aproximan desde el Oeste



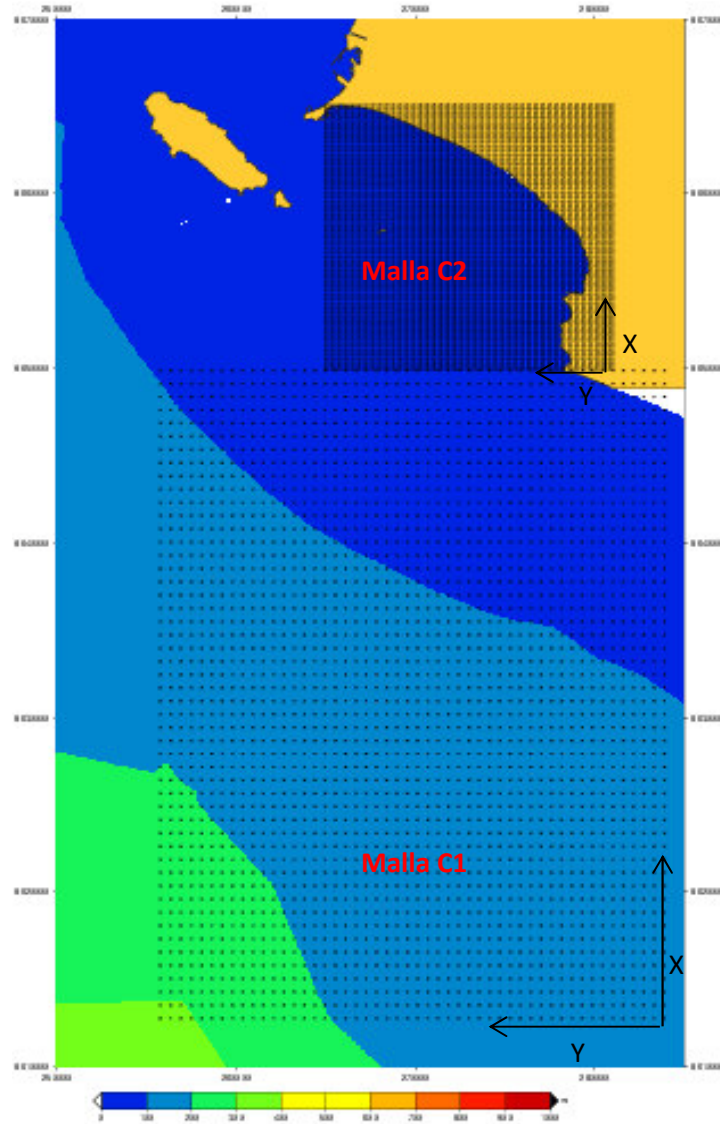
Fuente: Propia

Figura 6.15. Sistema de referencia y grilla de cálculo para las olas que se aproximan desde el Suroeste



Fuente: Propia

Figura 6.16. Sistema de referencia y grilla de cálculo para las olas que se aproximan desde el Sur



Fuente: Propia

### Casos mostrados

Con fines prácticos, de los casos mostrados en la Tabla 5.1, sólo se mostrarán resultados gráficos más representativos, tales como los casos predominantes y los extremos para cada componente de aproximación de olas, los mismos que se detallan a continuación.

Tarea 6.2. Casos de aproximación de olas estudiadas en la presente la tesis

<b>Caso</b>	<b>Tp (s)</b>	<b>Dirección de aproximación (°)</b>	<b>Hs (m)</b>	<b>%Oc anual</b>	<b>Días/año</b>	<b>Condición de ola</b>
1	13 - 15	Suroeste	2.5	21.92	79.99	Predominante
78	19 - 21	Suroeste	5.5	0	0.01	Extremos
9	11 - 13	Sur	2.5	2.7	9.87	Predominante
72	17 - 19	Sur	5.5	0.01	0.04	Extremos
12	15 - 17	Oeste	2.5	1.47	5.35	Predominante
67	19 - 21	Oeste	3.5	0.01	0.03	Extremos

## CAPITULO VII

### VII. RESULTADOS

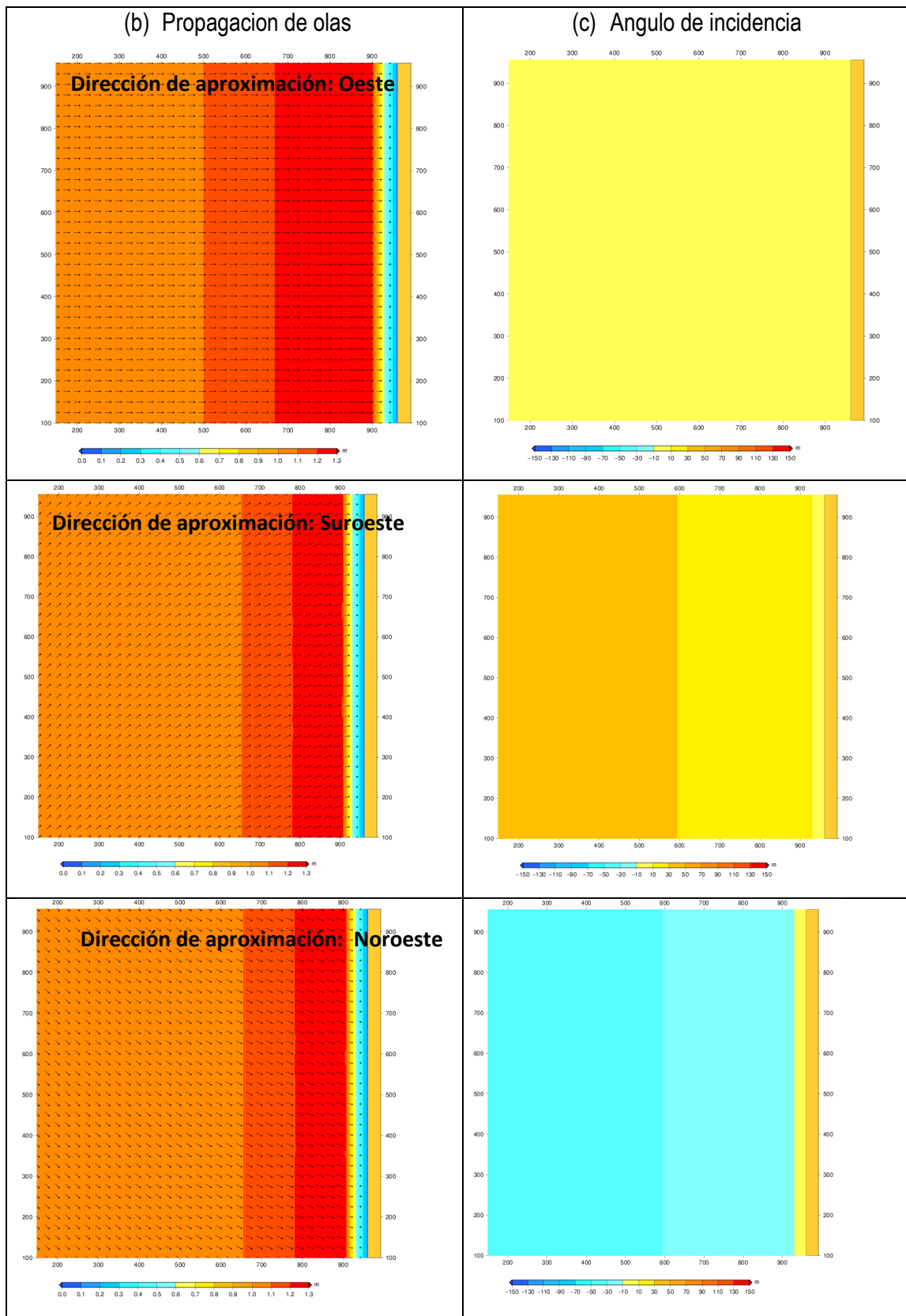
#### 7.1. Modelación a casos teóricos

La Figura 7.1 a Figura 7.5, muestra la propagación de las olas con una altura de 1.0m para las direcciones de aproximación del Oeste, Suroeste y Noroeste, observándose que la altura de ola se ve amplificada muy cerca a costa, para luego disminuir su altura bruscamente (zona de rompiente) y llega a costa. Así mismo se observa que bajo la misma batimetría las olas que se aproximan desde el Suroeste y Noroeste logran romper más cerca a costa. Por otro lado, el ángulo de incidencia de la ola se ve afectada por la batimetría y la dirección de propagación de la ola, ya que en aguas profundas se observa una variación casi despreciable para la aproximación de olas del Oeste (perpendicular a los veriles de profundidad), mientras que, para las olas que se aproximan del Suroeste y del Noroeste muestran una variación de hasta  $\pm 50^\circ$ , encontrándose dentro del rango de validez del modelo de acuerdo a las consideraciones del modelo ( $\pm 70^\circ$ ).

Para el caso de la propagación con un rompeolas, se muestra que las alturas de olas se ven disminuidas detrás de la estructura, formando una zona de sombra, cuyas alturas de olas son mínimas, así mismo, las dirección de las olas del Oeste, llegan a la estructura y tienen a cambiar de dirección, desviándose hacia el Noroeste y Sureste en la parte superior e inferior de la estructura respectivamente. Así mismo, se muestra que el ángulo de incidencia muestra que detrás de la estructura existe una variación  $\pm 50^\circ$ .

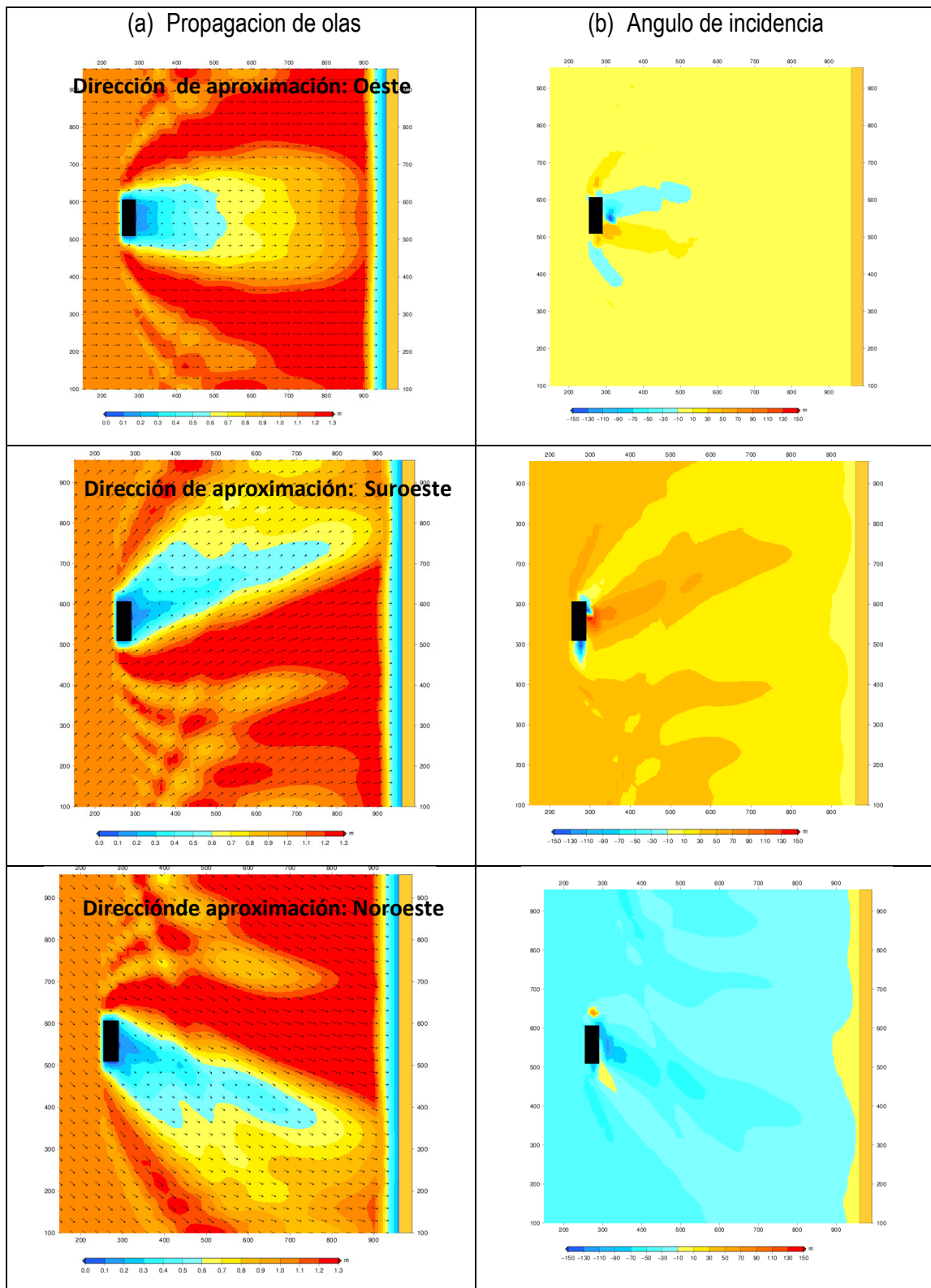


Figura 7.1. Modelación de olas para una batimetría plana y pendiente suave (a) Aproximación de olas desde el Suroeste, Oeste y Noroeste (b) Angulo de incidencia de la ola



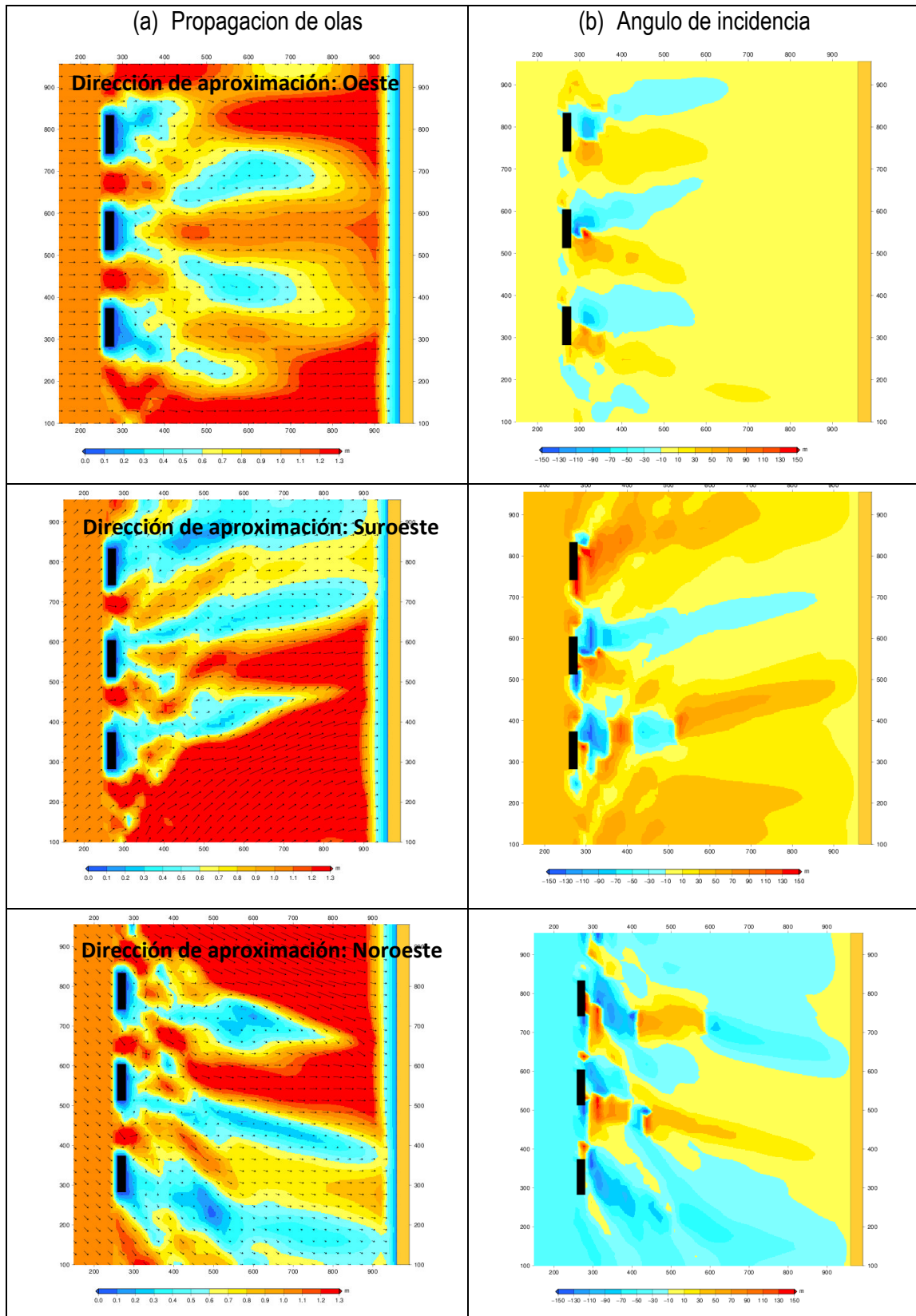
Fuente: Propia

Figura 7.2. Modelación de olas para una batimetría plana y pendiente suave (a) Aproximación de olas desde de Suroeste, Oeste y Noroeste (b) Angulo de incidencia de la ola



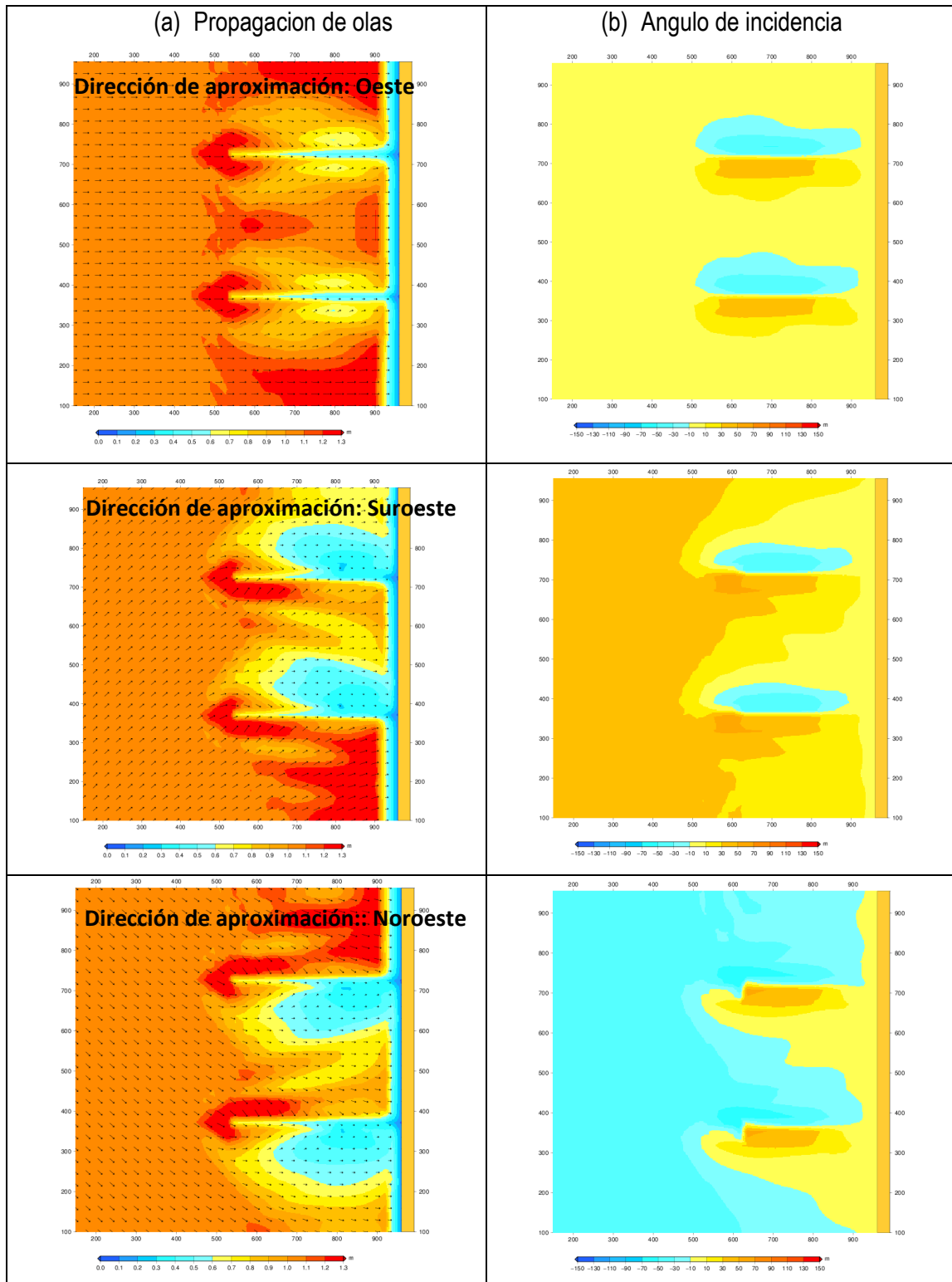
Fuente: Propia

Figura 7.3. Modelación de olas para una batimetría plana y pendiente suave (a) Aproximación de olas desde el Suroeste, Oeste y Noroeste (b) Angulo de incidencia de la ola



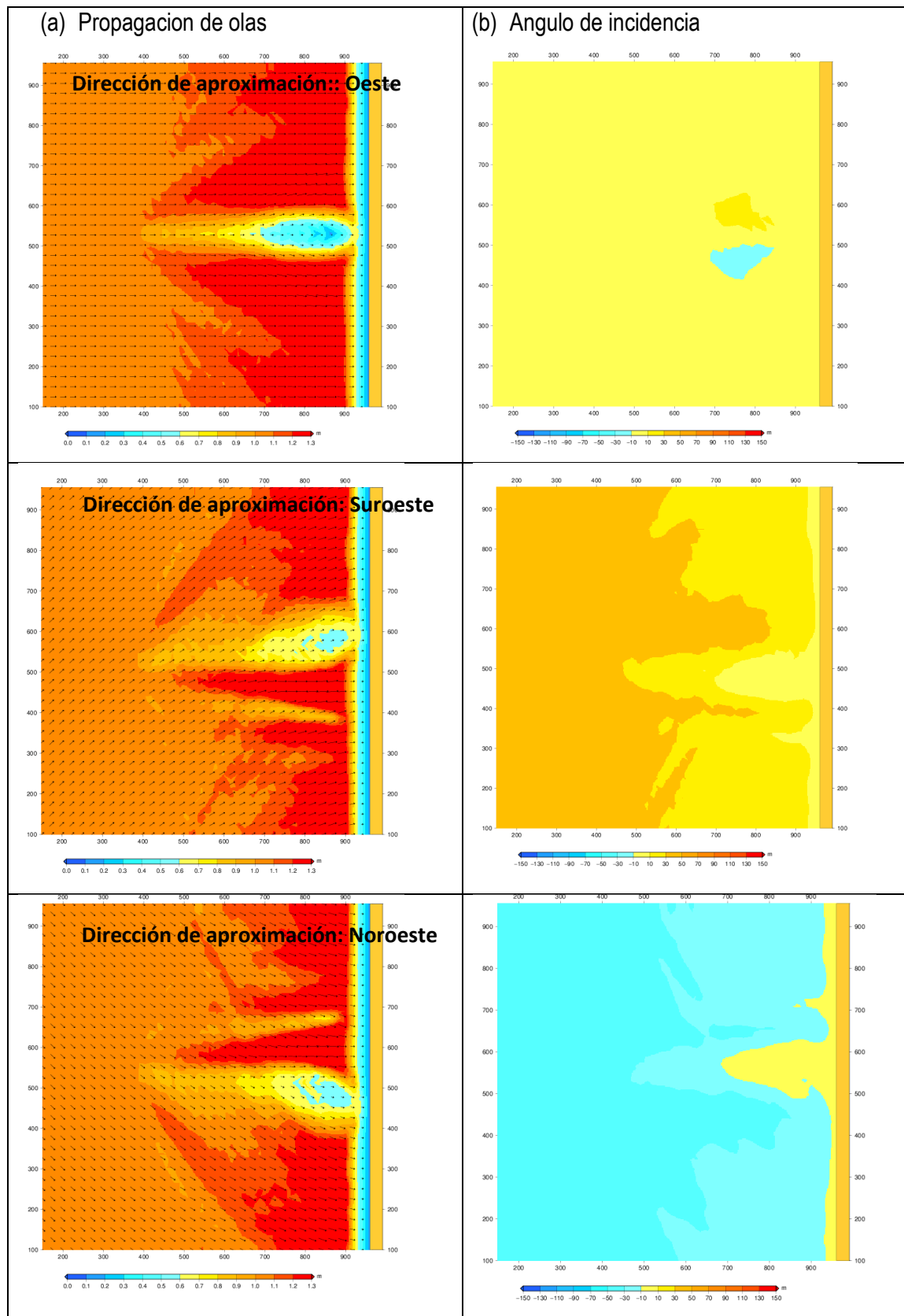
Fuente: Propia

Figura 7.4. Modelación de olas para una batimetría plana y pendiente suave (a) Aproximación de olas desde el Suroeste, Oeste y Noroeste (b) Angulo de incidencia de la ola



Fuente: Propia

Figura 7.5. Modelación de olas para una batimetría plana y pendiente suave (a) Aproximación de olas desde el Suroeste, Oeste y Noroeste (b) Angulo de incidencia de la ola



Fuente: Propia



## 7.2. Modelación de las olas en la bahía de Miraflores

La Figura 7.7, muestra los resultados de la propagación de olas para componentes que se aproximan desde el Suroeste en condiciones predominantes y extremas, que por fines prácticos son los únicos casos que se van a mostrar, donde se observa que las alturas de olas oscila en el rango de 2 a 4 metros (condiciones predominantes y hasta 5m evento extremo), siendo las máximas alturas las que se presentan en los distritos de San Miguel y Magdalena, mientras que las mínimas alturas se muestran en los distritos de Barranco y la zona norte de Chorrillos.

Para la dirección de aproximación de olas del Sur, la Figura 7.8, muestra que los distritos de Barranco y Chorrillos están protegidos de la acción de las olas debido a la configuración de la costa, así mismo, la parte más afectada es la zona norte de la bahía (distritos de Callao, San Miguel), tanto en condiciones predominantes como en evento extremo.

Para las olas que se aproximan desde el Oeste, la Figura 7.9 muestra que la parte más impactada de la bahía, es el sector de Magdalena, San Isidro, Miraflores, siendo la zona de San Miguel y Callao las más protegidas de la acción de las olas, debido a la configuración de la costa y a la presencia de la isla San Lorenzo, que actúa como una protección natural a estos distritos.

De esta manera, a partir de los casos de propagación, se puede establecer que la parte central de la bahía es la que se encuentra más sometida a la acción del oleaje, mientras que a parte Sur (Chorrillos) es la que presenta mayor protección contra el oleaje. Figura 7.6.

Figura 7.6. Caracterización de las olas en la bahía Miraflores



Figura 7.7. Propagación de olas con dirección de aproximación del Suroeste, en condiciones predominantes (Caso 01) y en condiciones extremas (Caso 93).

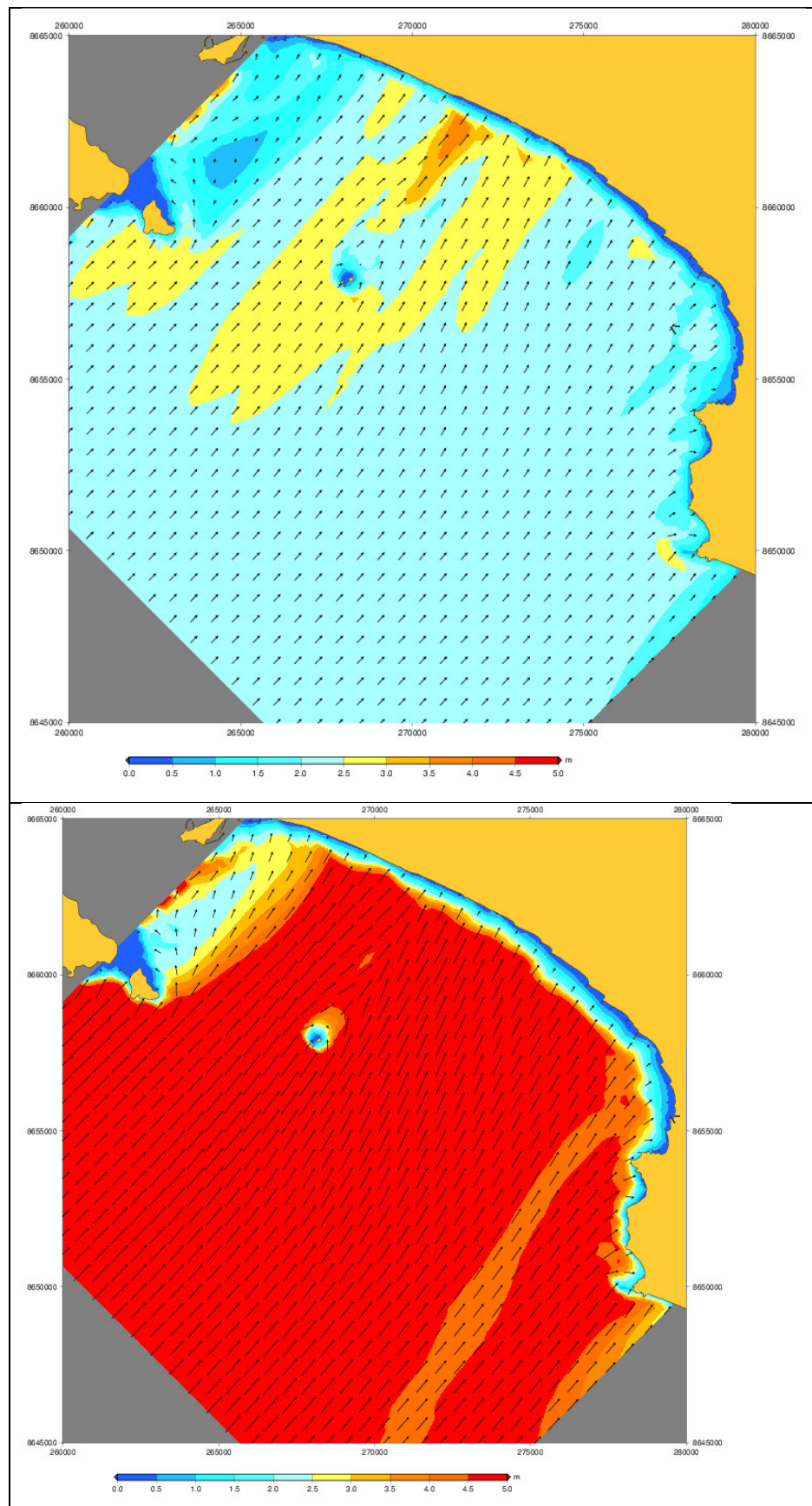


Figura 7.8. Propagación de olas con dirección de aproximación del Sur, en condiciones predominantes (Caso 09) y en condiciones extremas (Caso 85).

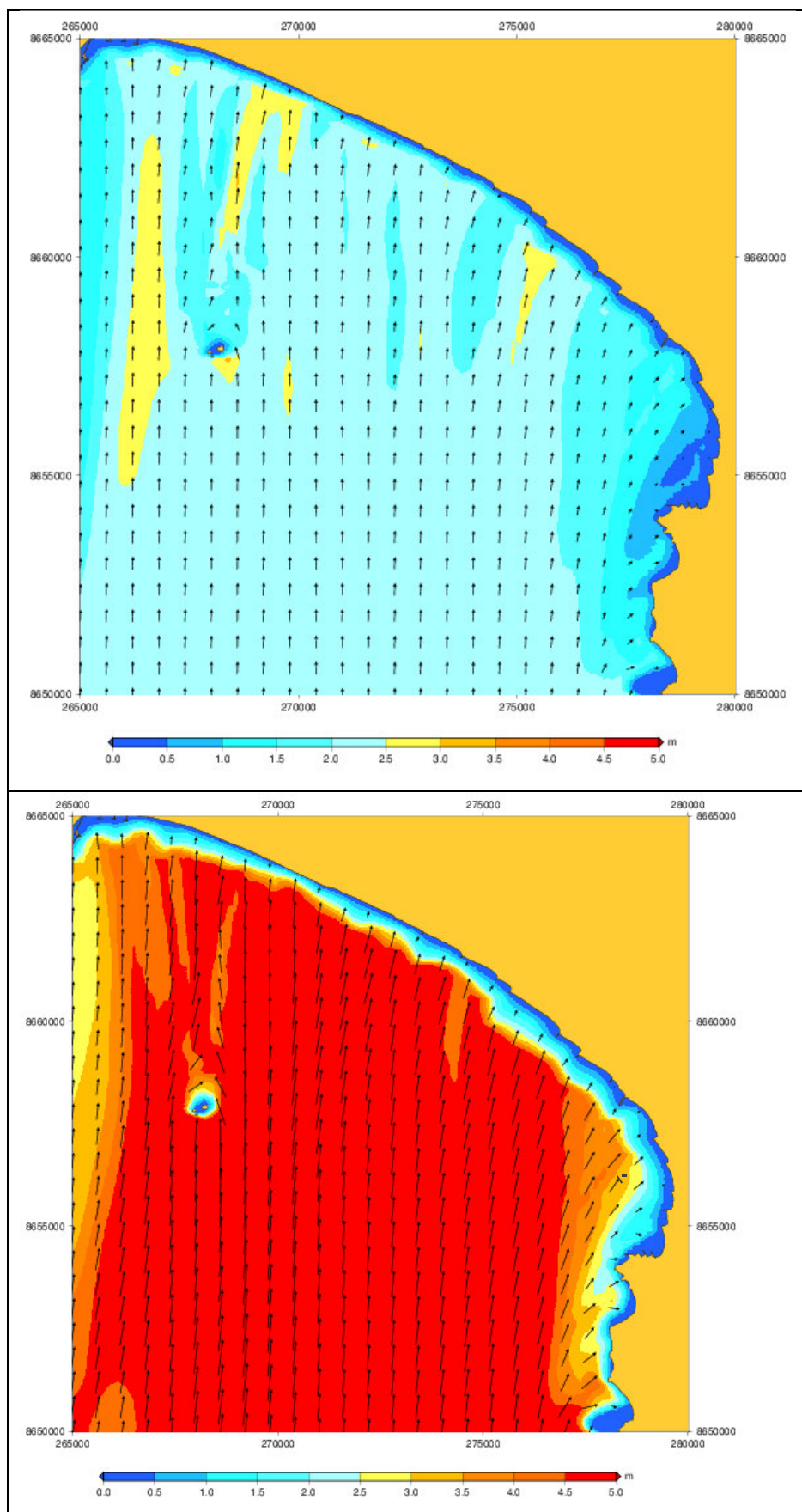
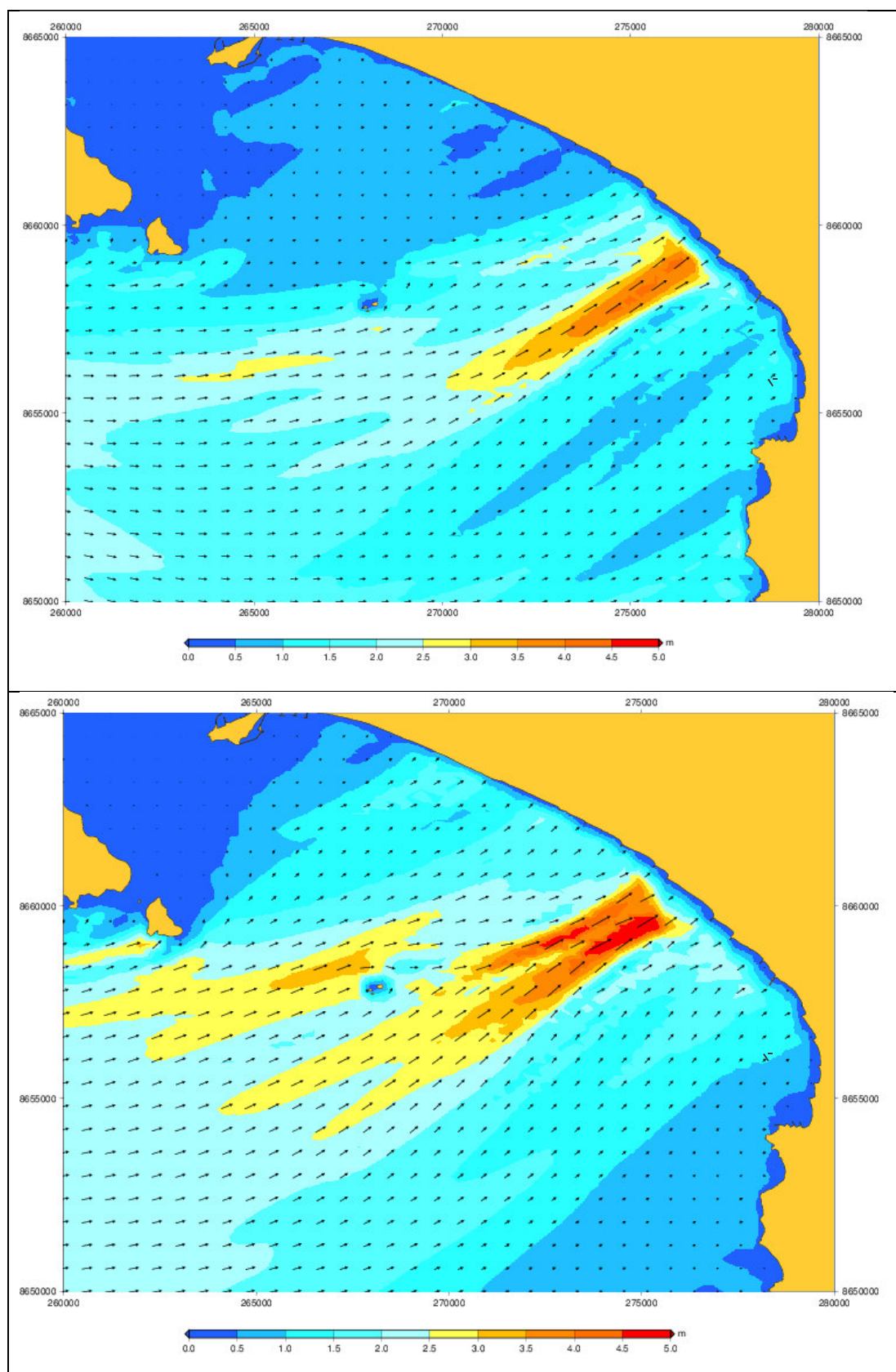




Figura 7.9. Propagación de olas con dirección de aproximación del Oeste, en condiciones predominantes (Caso 11) y en condiciones extremas (Caso 13).



### **7.3. Transformación del oleaje en las proximidades de la costa de la bahía de Miraflores**

Con la finalidad de observar las variaciones que puedan existir en la aproximación del oleaje cercano a la costa de la bahía, se establecieron 04 estaciones de control, en la que se simuló la propagación de las olas desde aguas profundas hacia poco profundas (Tabla 5.2), las que corresponden a la estadística de olas (reanálisis de olas - Modelo WW3) para la zona de estudio, observándose en la Figura 7.10 a Figura 7.12, muestra que las olas sufren una transformación, en cuanto a la dirección y altura, representando principalmente los procesos de refracción. En los cálculos realizados se considera que la modificación de la ola se da solo por refracción y “poca profundidad” debido a la grilla de cálculo y a las ubicaciones de las estaciones consideradas.

Por otro lado, en la , se muestra la transformación de olas en las estaciones designadas, mostrándose así mismo el coeficiente de refracción, el cual nos indica si existe una reducción o amplificación de la ola respecto al oleaje de aguas profundas para cada caso de propagación de olas.

Así mismo, se muestra el coeficiente de refracción ( $K_r$ ) en cada una de las estaciones, en la que se puede decir que los coeficientes de refracción mayores de 1 nos indican cambios considerables en la dirección de la ola, ocasionando una acumulación de energía bajo las condiciones de olas mostradas en cada uno de los puntos de control mostrados en la Tabla 7.1. Así mismo los valores menores a 1 ( $K_r < 1$ ) indica que existe una disipación de energía, y si  $K_r = 1$  no hay ni acumulación ni pérdida de energía del rayo de ola.

La información del coeficiente de “poca profundidad”, nos indica si existe una reducción de la profundidad, bajo las condiciones de olas propagadas en cada caso. En los resultados de Tabla 7.1, se muestra que los valores de coeficiente de “poca profundidad” menores a 1 están relacionados a los casos de propagación de olas con periodos pequeños, tales como  $< 8$ , lo que indica que a pesar de que estamos en una zona de aguas poco profundas (aproximadamente 10m), la ola no llega a sentir los efectos del fondo debido a que presentan un periodo de ola pequeños y por tanto una longitud de ola también pequeño. Así mismo, los coeficientes de “poca profundidad” mayores de 1, indican que estas olas sufren modificación de la ola debido al fondo marino.

Figura 7.10. Estaciones de monitoreo del comportamiento de olas (reanálisis de olas - Model WW3) cercano a costa y a lo largo de la bahía de Miraflores.



Fuente de datos: (NOAA - WWATCH). Ver también siguiente figura

Figura 7.11. Distribución de frecuencia direccional e histograma de alturas de olas para cada una de las estaciones de monitoreo de olas (reanálisis de olas – Modelo WW3) cercano a costa.

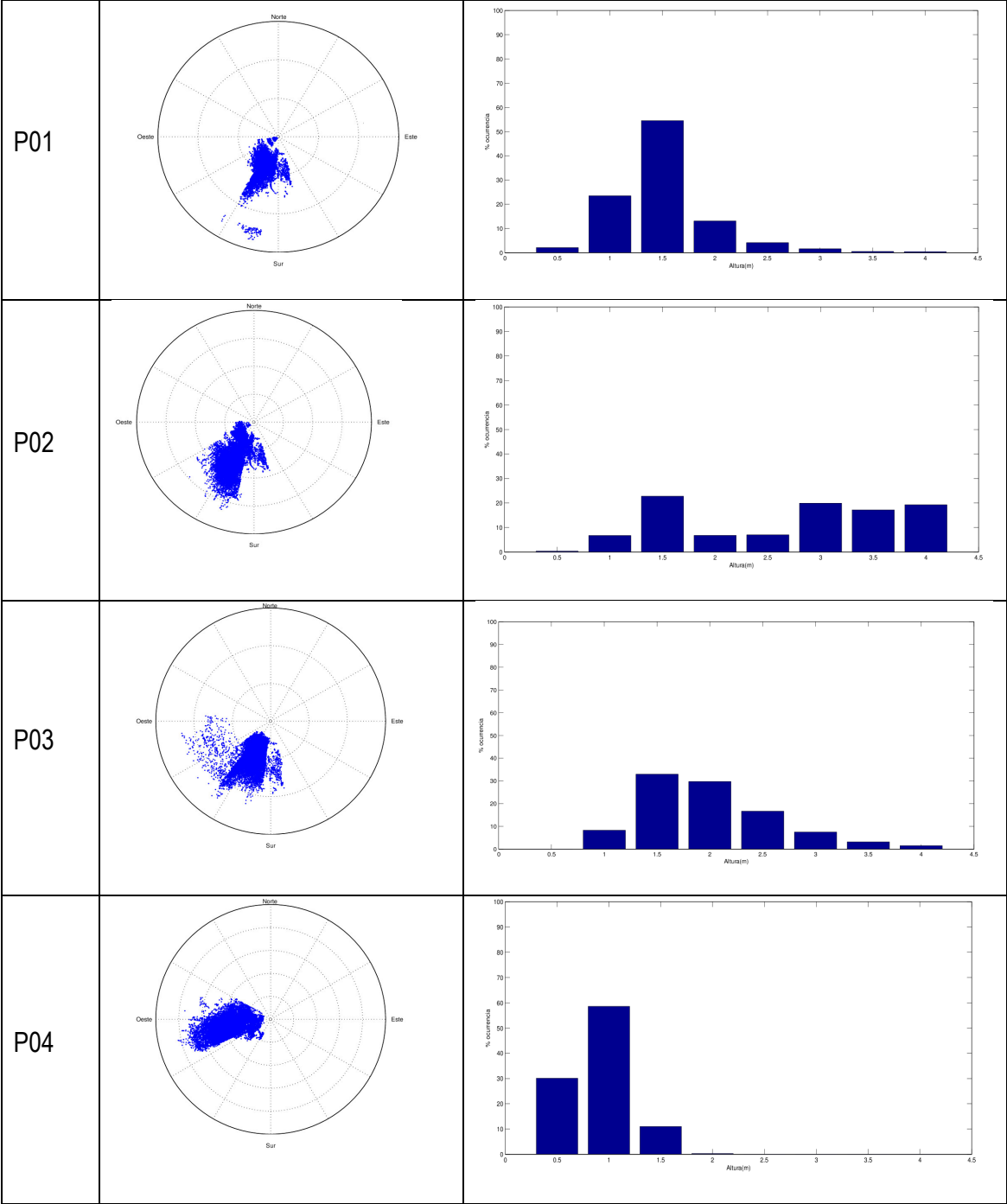
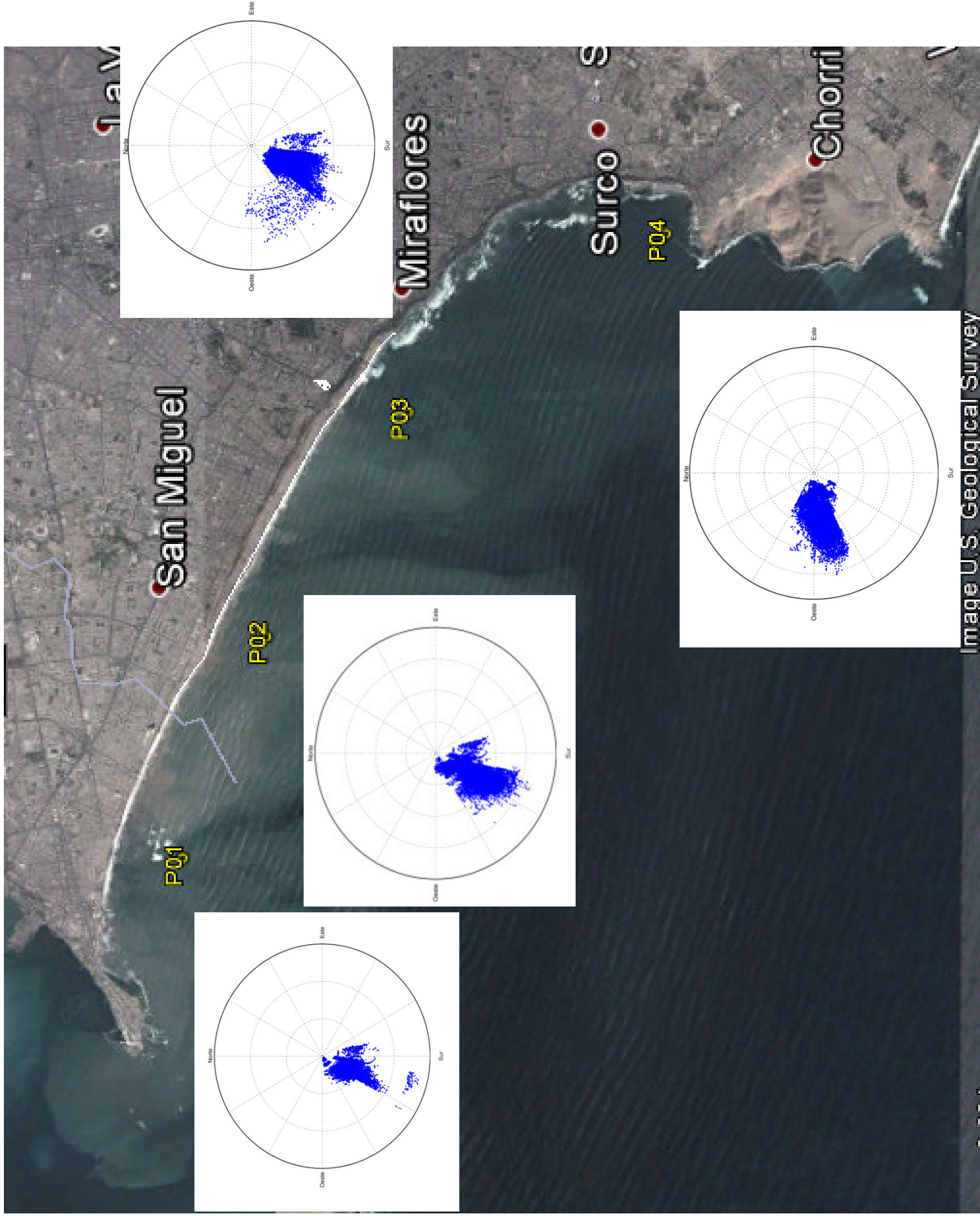


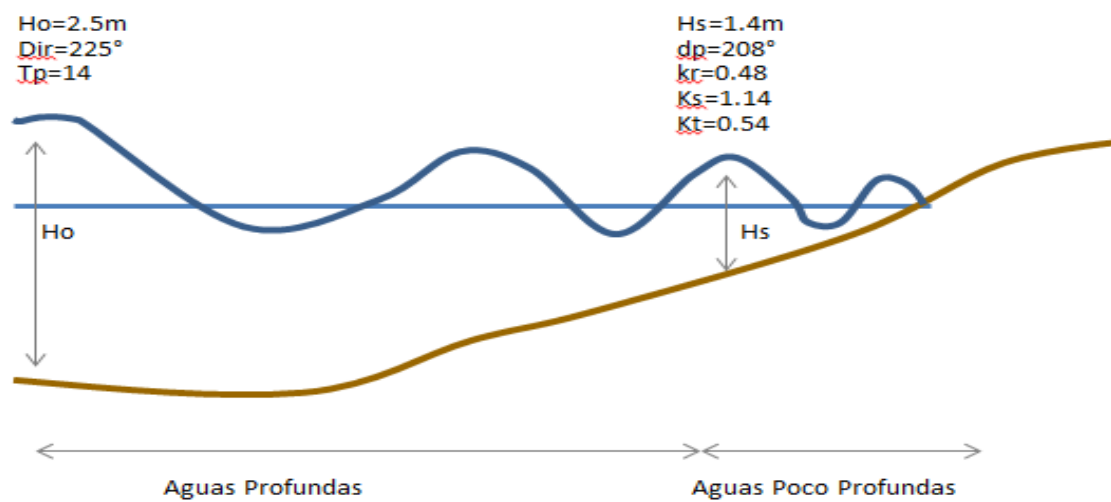


Figura 7.12. Distribución de frecuencia direccional de las olas en las estaciones cercanas a costa.



Fuente datos en aguas poco profundas: Propia

Figura 7.13. Representación de la transformación de las olas (Ejemplo: P01, Caso 01)



Fuente: Propia



#### 7.4. Validación

Durante años, la investigación del oleaje estaba restringida a su altura y periodo, ya que los equipos oceanográficos no registraban la dirección como parámetro de medida. Es por este motivo que los datos de olas provenientes de ológrafos, solo mostraban la información de altura y periodo de olas. Por este motivo, la validación de la presente tesis se realizó solo en el parámetro de altura de ola, ya que el periodo se mantiene constante (consideración del modelo).

Se tiene información medida en la bahía de Miraflores correspondiente al estudio realizado por (Delft Hydraulics, 1996), en la que se realizó mediciones de altura y periodo de las olas con un ológrafo Sea Bird, en 8 estaciones medidas en la bahía (Tabla 7.1 y Figura 7.14), por un periodo de medición de hasta 13 días entre Noviembre 1994 a Junio 1995 que es la única información existente de mediciones de olas en la bahía de Miraflores medidas con un ológrafo.

De la Tabla 7.2, observamos que el rango de alturas de olas se encuentra entre 0.40 a 3.24m, así mismo, para la validación se tiene que tener en cuenta que estas mediciones corresponden a información corresponde a periodos de medición muy cortos comparado con la información de climatología de olas utilizada febrero 2005 a julio 2013.

Tabla 7.2.- Estaciones de medición de olas.

Distrito	Estación	Periodo medición	Hs Prom.	Rango de Hs (m)
Magdalena	E1	05/Oct/94-09/Nov/94	1.40	0.63-3.02
San Miguel	E2	09/Nov/94-09/Dic/94	1.41	0.83-3.24
Miraflores	E3	09/Dic/94 – 09/Dic/95	1.15	0.73-2.04
Callao	E4	09/Ene/95-09/Feb/95	1.41	0.73-2.92
Barranco	E5	09/Feb/95-13/Mar/95	1.23	0.53-2.52
Callao	E6	13/Mar/95-12/Abr/95	1.00	0.40-1.92
Chorrillos	E7	12/Abr/95-22/May/95	1.23	0.63-2.74
Callao	E8	22/May/95-22/Jun/95	0.62	0.38 – 0.93

Fuente: (Delft Hydraulics, 1996)

Las estaciones de medición utilizadas se muestran en la Tabla 7.3, en la que se observa que solo las estaciones E4, E1, E3 y E7 corresponden a los puntos de control modelado P01, P02, P03 y P04 respectivamente.

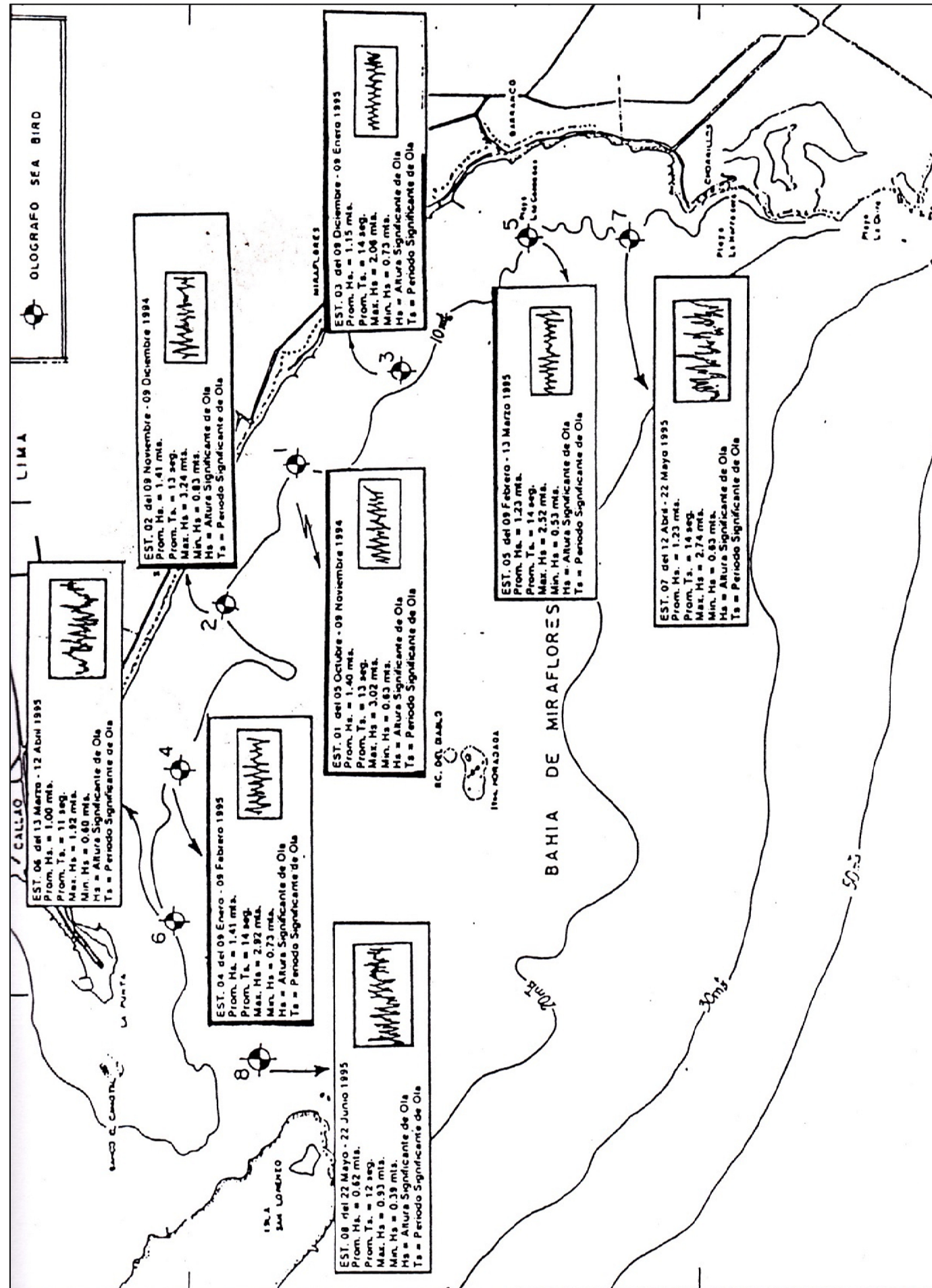


Tabla 7.3. Estaciones utilizadas para la validación.

Distrito	Estación	Medido		Modelado
		Hs Prom.	Rango de Hs (m)	Hs Predominante
Callao	P01	1.41	0.73-2.92	1.83
Magdalena	P02	1.40	0.63-3.02	3.57
Miraflores	P03	1.15	0.73-2.04	2.61
Chorrillos	P04	1.23	0.63-2.74	1.10

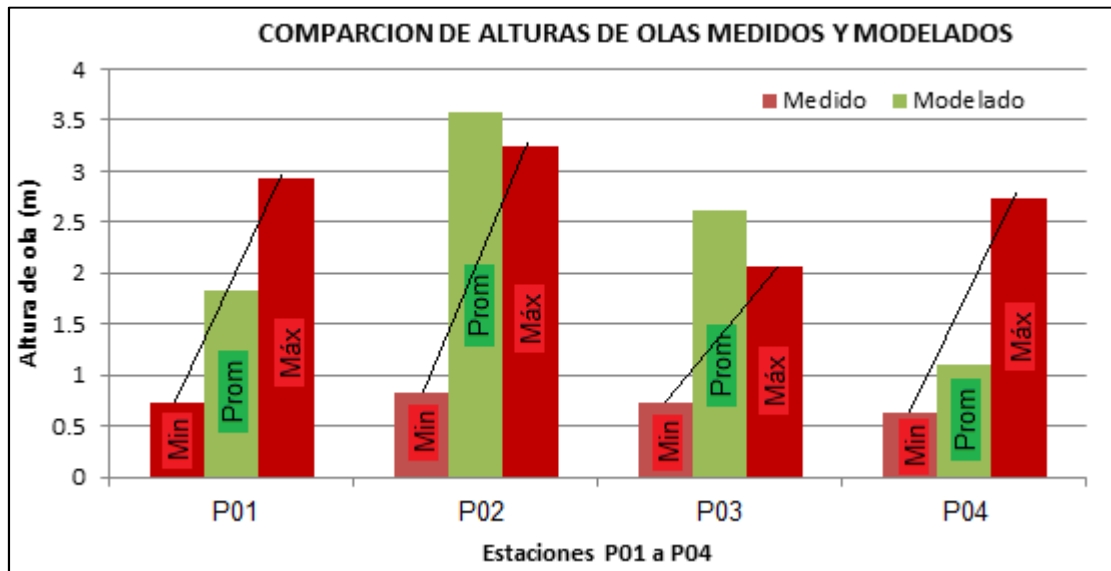
De esta tabla se observa que lo modelado se encuentra dentro del rango de medición para las estaciones P01 y P04, sin embargo las estaciones ubicadas en el centro de la bahía (P02 y P03) muestran alturas de olas por encima de lo medido debido a que lo modelado está representado una estadística de olas de condiciones predominantes y extremas para la bahía y no solo el evento que pueda haber sucedido en unos días como es el caso de las mediciones realizadas en la bahía. Sin embargo, a pesar de esto, los valores calculados en los puntos no se alejan mucho de los valores máximos medidos en aquellas fechas, por lo que los resultados de la modelación pueden ser consideradas adecuadas.

Figura 7.14. Resultado de las mediciones de oleaje en la bahía de Miraflores.



Fuente: (Delft Hydraulics, 1996)

Figura 7.15. Comparación de las alturas de olas resultado de las mediciones mínimas y máximas de olas - DELFT1996 (color rojo)) con las modeladas en la bahía de Miraflores (color verde).

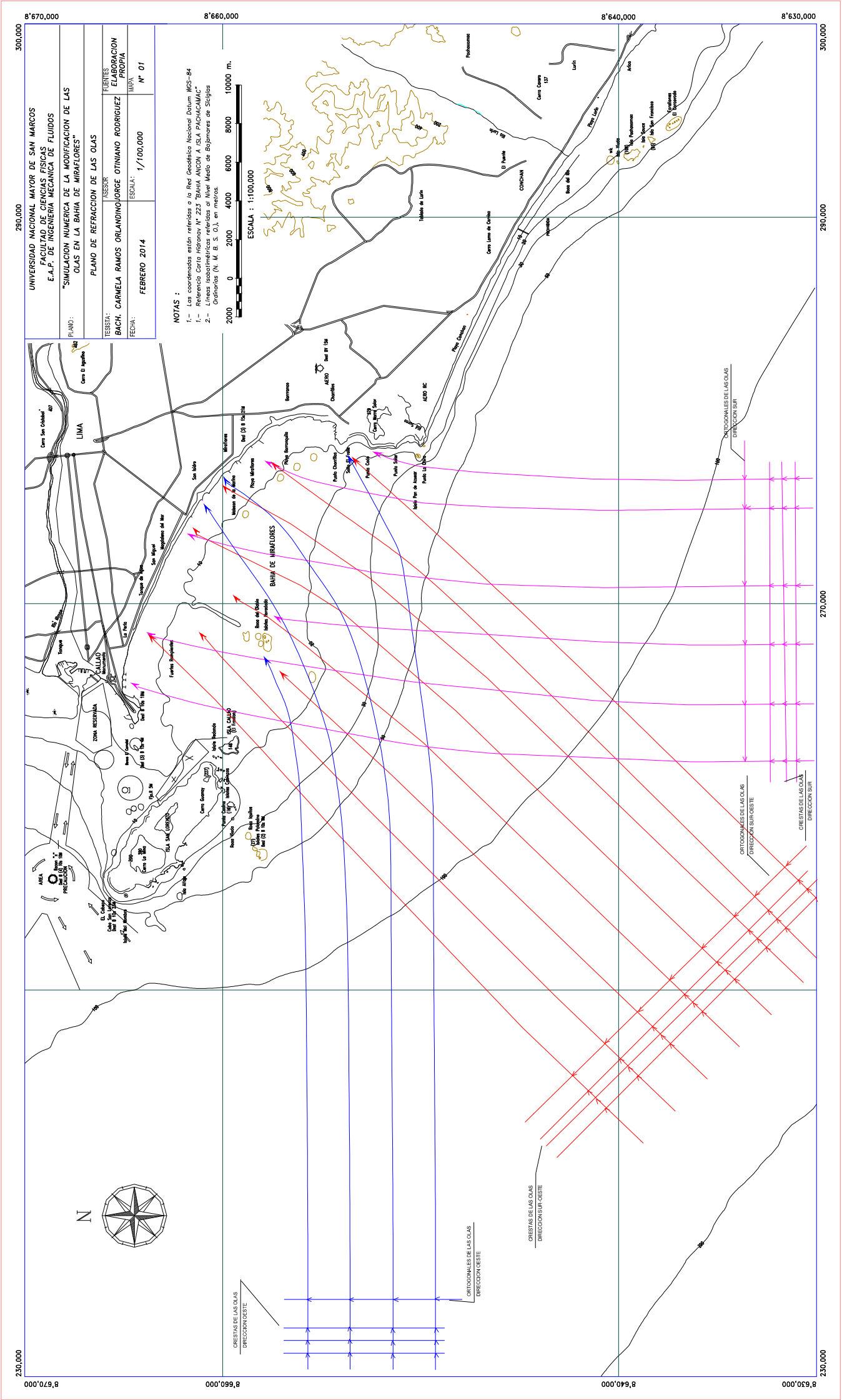


Fuente: Propia

Por otro lado, se realizó el diseño de los diagramas de olas (ley de Snell), con la finalidad de comparar lo simulado en cuanto a la dirección, ya que el método de Snell nos indica la dirección de olas resultante para la bahía de Miraflores.

Haciendo una comparación visual de la dirección de las olas para cada caso de propagación modelado (Figura 7.7 a Figura 7.9) con los resultados de los diagramas de olas (Ley de Snell - Figura 7.16) se observa que existe una buena aproximación de la dirección de olas entre lo modelado y calculado con la ley de Snell. Ver Anexo II.

Figura 7.16. Propagación de los rayos de olas de dirección Sur, Oeste y Suroeste



Fuente :Propia

## CAPITULO VIII

### **VIII. CONCLUSIONES Y RECOMENDACION**

#### **8.1. Conclusiones**

##### **- Modelo REFDIF**

- El modelo aplicado a diferentes casos teóricos mostrados en la sección 6.4.1, y considerando diversas propagaciones de dirección de olas, muestran una buena tendencia de los fenómenos de refracción y difracción de olas ya conocidos apriori.
- Debido a la falta de información continua de oleaje, no fue posible realizar una validación cuantitativa de los resultados, sin embargo, el modelo represento las características principales de la propagación de las olas hacia aguas costeras
- Para obtener unos resultados fiables del modelo, fue necesario crear varias mallas con diversas direcciones de propagación, debido a las limitaciones del ángulo de propagaciones considera el modelo, lo que resulta poco práctico para casos de clima de olas en aguas poco profundas.
- Desde un punto de vista ingenieril, el modelo es una buena herramienta para caracterizar la propagación de olas desde aguas profundas a poco profundas.

##### **- Aplicación a la bahía de Miraflores**

- En aguas profundas las olas presentan dirección predominante del Suroeste con 64.8% de ocurrencia, 4.9% de dirección Sur y 1.5% del Oeste, las cuales se propagan hacia aguas poco profundas.
- Debido a la morfología costera, las olas provenientes del noroeste no generan impactos sobre la zona de estudios por lo que no fueron considerados en los cálculos de altura de olas en aguas profundas y poco profundas para la zona de

estudio.

- En la bahía de Miraflores las olas que se aproximan desde el Suroeste y Sur presentan alturas entre 1.5 y 3.0m, siendo los distritos de San Miguel y Magdalena las zonas con mayores alturas de olas, por otro lado, los distritos de San Isidro, Miraflores y Barranco presentan alturas menores a 2.5m y en el distrito de Chorrillos la ola llega refractada y difractada con alturas menores a 1.0m.
- Las olas que se aproximan desde el Oeste son las que tienen mayor impacto en los distritos de San Isidro y Miraflores, esto debido a la configuración de la línea de costa y a los veriles de profundidad, siendo los distritos de San Miguel y Magdalena los que presentan alturas de olas menores a 2.0m, ya que la Isla San Lorenzo actúa como protección de las olas a estos distritos. Por otro lado los distritos de Barranco y Chorrillos de acuerdo a su configuración geomorfología presentan alturas de olas menores a 1.0m.

Por otro lado, de los resultados de clima de olas calculados en aguas poco profundas Tabla 7.1 y Figura 7.12, se determina que en los puntos P01 y P04 se da una reducción de la ola, lo que está relacionado a la geomorfología costera, mientras que en P02 y P03 se da un proceso combinado de amplificación y reducción de los periodos de olas, encontrándose que los máximos periodos de olas están relacionados a amplificaciones de olas y los periodos mínimos a reducción de la ola.

## **8.2. Recomendaciones**

### **- Modelo REFDIF**

- Los resultados del clima de olas en aguas poco profundas facilitaran los próximos estudios de modelación de olas a detalle que involucren el diseño de estructuras marinas.
- Se deben realizar mediciones de olas por periodos de tiempo más largo en aguas costeras, con la finalidad de poder validar de manera cuantitativa los resultados del modelo.

- Comparar los resultados de olas del modelo con otros modelos de oleaje disponibles como el SWAN, con la finalidad de comparar las diferencias entre cada modelo para la zona de estudio.
- **Aplicación a la bahía de Miraflores**
- Realizar trabajos de medición de olas en la bahía de Miraflores por un periodo mínimo de 1 año con la finalidad de validar adecuadamente el modelo de olas (climatológico).

## CAPITULO IX

### IX. BIBLIOGRAFIA

Cantabria, U. d. (2000). *Dinamicas*.

CORD. (1988). *The Center for Occupational Research and Development*.

Dally, W., Dean, R., & Dalrymple, R. (1985). Wave height variations across beaches of arbitrary profile.

D'Angremond K, K., & Van der Velden. (1980). *"Introduction Coastal Engineering, Delft University of Technology, Delft, The Netherlands*.

Dean, R., & Dalrymple, R. (1984). *Water Wave Mechanics for Engineers and Scientists*.

Delft Hydraulics. (1996). *Estudios costeros de la Bahía de Miraflores*.

DHN - Carta batimetrica N°223. (2000). *Dirección de Hidrografía y Navegación - Marina de Guerra del Perú*.

DHN - Carta batimétrica N°2236. (1995). *Dirección de Hidrografía y Navegación - Marina de Guerra del Perú*.

DHN. (1995). *Dirección de Hidrografía y Navegación - Marina de Guerra del Perú*.

*Dinamica Marina*. (s.f.). Obtenido de <http://html.rincondelvago.com/dinamica-marina.html>

Fernandez, P. (2006). *Energía de las olas*.

Foros Peru. (s.f.). Obtenido de <http://www.forosperu.net/showthread.php?t=514274>

Fuentes, C. (2001). *Ingeniería Portuaria*.

GEBCO. (s.f.). *The General Bathymetric Chart of the Oceans*.

GIOC, U. (2000). *Documento de referencia: Dinamicas*.

Guisado, E., Malvárez, G., & Navas, F. (2010). Los modelos de propagación de oleaje, simulación morfodinámica y las Tig. *Tecnologías de la Información Geográfica: la Información Geográfica al Servicio de los Ciudadano*.

Hedges, T. (1976). *An empirical modification to linear wave theory*.

Holthuijsen, L. H. (2007). *Waves, Waves in Oceanic and Coastal Waters*.

Hughes, S. A. (1993). *Physical Models and Laboratory Techniques in Coastal Engineering*. World Scientific.



- James/REFDIF. (1994). Combined Refraction/Difraction Model. En J. T. Dalrymple.
- Komar, P. (1973). *The threshold of movement under oscillatory water waves*.
- La Lima que se fue. (s.f.). *blogspot*. Obtenido de <http://lalimaquese fue.blogspot.com/2012/02/foto-detalles-playa-y-banos-de-la.html>
- Le Roux, J., Tavares, C., & Alayza, F. (2000). Sedimentology of the Rímac-Chillón alluvial fan at Lima, Peru, as related to Plio-Pleistocene sea-level changes, glacial cycles and tectonics. *Journal of South American Earth Sciences*.
- Liu, P., & Dalrymple, R. (1984). The damping of gravity water waves due to percolation "Coastal Engineering".
- Liu, P., & Losada, I. (s.f.). *El modelado matemático de la propagación del oleaje en Ingeniería de Costas*.
- Liu, P., & Losada, I. (s.f.). El modelo matemático de la propagación del oleaje en Ingeniería de Costas.
- Macdonel, G., Herrejón, L., Pizá, J., & López, H. (1999). *Ingeniería Marítima y Portuaria*. Alfaomega.
- Meted. (2012). *Wave Types and Characteristics*. Obtenido de <https://www.meted.ucar.edu/about.php>
- Munk, W. (1950). *Origin and Generation of Waves*.
- NDBC - Boya 32012. (s.f.). *National Data Buoy Center*. Obtenido de [http://www.ndbc.noaa.gov/historical\\_data.shtml](http://www.ndbc.noaa.gov/historical_data.shtml)
- NOAA - WWATCH, M. (s.f.). *Modelo Wave Watch*. Obtenido de <ftp://polar.ncep.noaa.gov/pub/history/waves/>
- Tenorio, M. L. (2011). Desarrollo e integración de modelos numéricos de calidad de agua en un sistema de información geográfica.
- UCAR's, U. C. (s.f.). *MetEd*. Obtenido de <https://www.meted.ucar.edu/>
- UNIVERSIA. (s.f.). Obtenido de OpenCourseWare y Portal Universia: <http://mit.ocw.universia.net/1.138J/OcwWeb/Civil-and-Environmental-Engineering/1-138JWave-PropagationFall2000/Simulations/detail/groupvel.htm>
- USACE, & U.S. Army Corps of Engineers. (2002). *Coastal Engineering Manual*.
- (2002). Coastal Engineering Manual. En U. A. USACE, *US*.

## **CAPITULO X**

### **X. ANEXO**

ANEXO I. Archivos de ingreso al modelo REFDIR

ANEXO II. Propagación de los rayos de olas de dirección Sur, Oeste y Suroeste

# ANEXO I.

## Archivos de ingreso al modelo REFDIR

### Ejemplo de malla A1 "REFDAT.DAT"

299.3115304.3050293.5180281.1219272.8731267.3143261.7554256.1966250.6378245.3245244.3844244.1377244.0837244.0581244.0325244.0070  
244.9311241.2930239.0131236.7333234.4534232.1735229.8936227.6137226.5798226.0075224.8303223.6531228.8134228.5421222.9331219.3270  
217.4398215.7225214.0123212.3574210.9076209.4579208.5724207.8727207.5400206.4823204.8891204.5012202.7052200.9092200.3125200.8903  
202.3303203.7703  
285.0461290.0396286.4692274.0731268.3499262.7911257.2323252.1511247.7176243.2841241.9520241.7054241.4587241.2121240.9654240.7188  
238.8773236.0359233.7560231.4761229.1962226.9164224.6365222.3566220.9913220.7862219.6838218.5066217.3295218.6859214.9146213.0093  
211.1364209.4191207.7018206.0089204.8041203.6008202.3819202.0452201.7125200.2959198.0418196.6086195.7312195.5531195.4047195.4714  
195.5381196.0021  
270.7807275.7742279.4205269.3856263.8268258.9778254.5442250.1107245.6772241.2436239.5196239.2730239.0263238.7797238.5330238.2864  
234.4718231.7662228.4989226.2190223.9391221.6592219.3794217.0995215.4028215.1977214.5374213.3602212.1830211.3046208.6241206.6916  
204.8330203.2408202.2741201.1211199.5349198.3316197.1100196.2177195.8850194.1094191.8554191.2622190.8178190.6398190.4968190.5636  
190.6303190.8562  
260.2983263.8811267.4640265.8044261.3708256.9373252.5038248.0702243.6367239.2032237.0872236.8406236.5939236.3473236.1007234.6262  
230.3640228.0438224.4655220.9619218.6820216.4021214.1222211.8424209.8144209.6093209.3910208.2138207.0366209.7562203.8932201.4822  
199.5287198.5321197.5654196.2994194.4672193.0624191.8381190.5963190.0575187.9502187.6106187.1991186.2166185.7265185.5890185.6558  
185.9608186.4298  
253.8743257.4572261.3837263.0453259.3304254.8969250.4633246.0298241.5962237.1627234.6548234.4082234.1616233.9149233.6683230.5183  
226.2561223.5714221.0120217.1648213.4249211.1450208.8651206.5852204.3054204.0208203.8157203.0674201.8902208.2077199.1623196.7514  
195.1117193.8234192.8567191.4777189.6455187.8133186.5662185.3244184.1496183.8101183.4706183.1310182.1535181.1710180.6812181.0654  
181.5344181.9776  
247.4503251.3355255.4308257.1225257.2899252.8564248.4229243.9893239.5558235.1223232.2224231.9758231.7292231.4825230.6726226.4104  
222.1483219.0990217.2104213.7113209.8641206.0169203.6080201.3281199.0482198.4323198.2272197.9209206.4668206.6593195.7172192.0345  
190.6946189.3547188.1480186.6560184.8238183.9166182.6824181.7805180.8795179.9828179.3305178.9910178.0905177.3586177.1741176.6390  
177.1080177.4076  
241.2874245.3827249.4780251.1998251.7230250.8159246.3824241.9489237.5153233.0818229.7901229.5434229.2968229.0501226.5648222.3026  
218.0404214.6266212.7380210.2578206.4106202.5634198.7162196.0710193.7911192.8439192.6387192.4336214.3375205.1109194.1688187.6175  
186.2776184.9880183.8776183.0060182.2282181.4503179.8405178.6311177.7304176.8337175.9370175.0402174.8759174.8935174.6459173.8445  
173.0430173.1087  
235.3345239.4298243.5251245.2770245.8003246.3235244.3420239.9084235.4749231.0413227.3577227.1110226.8644226.6177222.4569218.1947  
213.9325210.1542208.2656206.3770202.9571199.1099195.2627191.4155188.5340187.2554187.0503188.2715211.6026202.6915191.5756184.7061  
183.6242182.5138181.4034180.5465179.7618178.9500177.2309175.5118174.5813173.6846173.4618173.5564172.4107172.4283172.1178171.3163  
170.5661170.4863  
229.3817233.4770237.5723239.3543239.8775240.4007240.9239237.8680233.4344229.0009224.9253224.6786224.4320222.6112218.3490214.0868  
209.8247205.6818203.7932201.9046199.5036195.6564191.8092187.9620184.1149181.9036183.3944184.8852201.8732199.5956188.4797182.1361

181.1380180.0396178.9534178.1198177.2955176.3404174.6213172.9023171.9269172.0214172.1160172.0152170.5940169.9631169.5896168.8184  
168.4155168.4000  
223.4288227.5241231.6194233.4315233.9547234.4779235.0012235.5244231.3940226.9604222.5269222.2463221.9996218.5033214.2412209.9790  
205.7168201.4546199.3208197.4322195.5436192.2029188.3557184.5085180.6613179.9763180.0082181.4990192.1438190.8135185.3839179.5661  
178.5680177.5654176.5267175.6931174.8595173.7432172.4747171.2063170.5853170.6756170.7702170.3969168.9757167.5545167.0707166.6678  
166.2649166.3137  
217.4760221.5713225.6666227.5087228.0319228.5552229.0784229.6016229.3535224.9200220.4865219.8139218.6576214.3955210.1333205.8711  
201.6089197.3468194.8484192.9598191.0711188.7494184.9022181.0550178.6255178.8364178.7305178.6247182.4144181.0840179.7537176.9961  
175.9995175.0618174.2811173.5658172.8504172.0977170.9810169.7125169.2460169.3329169.4243168.7786167.3575166.0585165.1677164.5172  
164.1143164.2274  
211.5231215.6184219.7138221.5860222.1092222.6324223.1556223.6789224.2021222.8795218.4460217.3815214.5498210.2876206.0254201.7633  
197.5011193.2389190.3760188.4873186.5987184.7101181.4487177.6015177.4492177.6964177.5906177.2243176.5133175.9307175.2781174.7834  
173.8457172.9079172.3024171.7090170.9937170.2231169.4473168.2188167.9067167.9936168.0804167.3107166.1822165.0538164.2252163.4515  
162.6778162.4625  
205.5703209.6656213.7609215.6632216.1864216.7096217.2329217.7561218.2793218.8025216.4056214.7041210.4419206.1798201.9176197.6554  
193.3932189.1310185.9035184.0149182.1263180.2377177.9952176.0120176.2676175.7363175.2179174.4845173.7945173.3562172.7036172.2719  
171.6918170.7541170.2529169.8364169.1243168.3485167.5727166.7251166.5674166.6263166.6838166.3059165.1775164.0512163.2813162.5090  
161.7455161.0522  
199.6174203.7128207.8081209.7404210.2637210.7869211.3101211.833212.3565212.8798213.4030210.5962206.3341202.0719197.8097193.5475  
189.2854185.0232181.4312179.5425177.6539175.7653173.9432173.4989172.9668172.4708172.3136171.7446171.0757170.6608170.1291169.7139  
169.3876168.6198168.2034167.7873167.4826166.8073166.1320165.4593165.1570165.2145165.2629164.8779164.1727163.1072162.3373161.5665  
160.8213160.1281  
193.6646197.7599201.8552203.8177204.3409204.8641205.3873205.9106206.4338206.9570207.9278207.8797202.2262197.9640193.7019189.4397  
185.1775180.9153176.9587175.0701173.1815171.2929170.6514170.1895169.6661169.2053169.0481168.8909168.3569167.9420167.5271167.1559  
166.7979166.5881166.1991165.8101165.8810165.7999165.1246164.4709163.8626163.8027163.7731163.3882163.0032162.1632161.3933160.6234  
159.8972159.2039  
187.7118191.8071195.9024197.8949198.4181198.9413199.4646199.9878200.5110201.0342203.7635203.6387200.9526194.1720189.5940185.3318  
181.0696176.8074172.5453170.5977168.7091167.3605167.3331166.8509166.3653165.9398165.7826165.6159165.3238164.8132164.3026164.1513  
163.7643163.6796164.2219163.8329163.9619164.4538164.1172163.4824162.8741162.3909162.2834161.8984161.5867161.2636160.4981159.7326  
159.6321159.0385  
181.7589185.8542189.9495191.9721192.4954193.0186193.5418194.0650194.5882197.1690198.7181198.1768199.9865194.0255187.2449181.2240  
176.9618172.6996168.4374166.1253164.2367164.0687163.9945163.5123163.0300162.6580162.4713162.2845161.9690161.4671160.9564160.9100  
160.7306160.6881161.5405161.8558162.0428162.5347163.0265162.4939161.8857161.2774160.8855160.6700160.4545160.2738159.6441158.8820  
159.3927159.0897  
175.8061179.9014183.9967186.0494186.5726187.0958187.6190188.1423189.9719193.6072193.6727192.7150194.5247193.8789187.0983180.3177  
173.5371168.5917164.3296161.6529160.7779160.7769160.6559160.1317159.5935159.2546159.1398158.9531158.6130158.1202157.6379157.6099  
157.5820157.6966158.5491159.3783159.6776159.7663159.8550160.6088159.9905159.3722159.6489159.5379159.3224159.1516158.7901158.2905  
158.8011159.1409  
169.8532173.9485178.0438180.1266180.6498181.1730181.6963182.7749186.4101189.7980188.6273187.4566189.0629190.8726186.9518180.1712  
173.3906166.6100160.2217157.4870157.5011157.5272157.2848156.6701156.1318155.8195155.7410155.6217155.2571154.7643154.3378154.3099  
154.3831154.5200155.1951155.9483156.3897156.4993156.6445157.8527158.0774157.4590157.9531158.4057158.1987158.0294157.8602157.6989  
158.2096158.6219  
163.9004167.9957172.0910174.2038174.7270175.2503175.7735179.2131182.8484184.7526183.5819182.4112183.6011185.4108186.8052180.0246

173.2440166.4634158.5915154.2669154.2903154.3163153.9777153.2783152.6702152.3845152.3060152.2733151.9606151.4943151.1805151.3330  
151.4123151.5597151.7975152.5183152.9650153.2324153.4650154.6731155.8813155.6412156.2574156.8736157.0765156.8052156.4495156.6888  
156.9211157.1534  
157.9475162.0428166.1381168.2811168.8043169.3275172.0160175.6513179.2866179.7072178.5365177.3658178.1393179.9490181.7587179.1738  
171.1969163.2200155.2431151.3568151.0795151.1055150.6707149.9713149.2719149.0869149.2340149.3810148.8603148.3197148.0089148.3279  
148.4416148.5994148.8372149.0884149.5403149.8475150.2855151.4936152.7023153.5982153.6952153.7922154.8034154.4477154.0921155.2202  
155.4525155.5779  
153.4598156.0900160.1853162.3583162.8815164.8190168.4543172.0895175.7248174.6618173.4911172.3204172.6774174.4872176.2969171.3089  
167.7041159.8716151.8947148.4467148.1097147.8947147.3637146.9792146.7694146.3894146.3416146.4887145.9106145.1450144.8374145.1563  
145.4708145.6391145.9819146.6091146.7493147.0866147.3506148.3962149.6181150.1322150.0595150.1565151.6881152.0903151.8776153.3150  
153.9839153.9703  
151.2771150.6613154.2325156.4355157.6219161.2572164.8925168.5277170.7871169.6164168.4457167.2750167.2156169.0253170.8350161.7363  
158.1316154.5269148.5463145.5365145.1995145.1724144.8779144.6681144.4582144.0536143.6043143.5964142.9610142.1786141.6658142.1680  
142.8658143.4143144.0415144.6688144.4294144.6669144.8958145.3120146.5339146.7391146.4238146.5208148.3879149.7328149.9269151.3642  
152.5154152.3626  
149.0944148.4786148.2796150.5128154.0601157.6954161.3307164.9659165.7417164.5710163.4004162.2296161.7538163.5635162.7589152.1638  
148.5591144.9543143.2823143.1848143.1616143.1385142.7163142.3569142.1471141.7177141.2684140.8474140.5569140.2063139.9357140.4451  
141.1429141.5146142.1012142.6158142.3309142.2472142.4409142.5654143.4497143.3460143.0077143.1079145.0878147.0677147.9761149.4135  
150.8509150.7066  
147.4281146.7537146.0793146.8631150.4984154.1336157.7689161.4041160.6963159.5256158.3550157.1842156.2920158.1017154.2246143.5438  
141.7939141.5241141.2543141.1692141.1277141.1046140.6691140.1965139.8312139.4518139.2654139.0790139.2224138.8845138.6223138.7221  
139.4200139.7548140.1608140.5173140.2324139.9474139.9912140.1106140.2913140.1694140.1855140.3652142.3369144.3086145.4438146.7145  
148.0001148.9483  
146.5546145.8802145.1912144.1110146.9366150.5718154.2071156.8216155.6509154.4802153.3096152.1388150.9682152.6399145.6903140.3024  
139.7660139.4962139.2264139.1631139.1101139.0707138.6219138.2672137.9724137.6834137.4971137.3183137.4744137.5627137.3088137.3122  
137.6971137.9950138.2371138.4188138.2524138.2550138.4383138.5171138.5463138.5234138.5396138.7874140.1846142.1563142.5473143.7557  
145.1945147.1544  
145.6811145.0067144.1531143.0729143.3748147.0101150.6453151.7762150.6055149.4349148.2642147.0935145.9228147.1781138.2788138.6356  
138.0984137.4683137.2100137.1570137.1040137.3792136.9682136.6786136.3800136.0420135.7287135.5702135.7264135.8826135.9967135.9991  
136.0022136.2931136.5967136.5828136.5677136.6313136.8855136.9642136.9526136.8776136.8937137.2378138.0323139.7777140.0676140.7968  
142.3890144.3488  
144.8076144.1332143.1150142.0348140.9545143.4483147.0835146.7308145.5601144.3895143.2188142.0481140.8774139.3024136.6120136.9688  
136.4313135.7479135.2038135.5142135.8439136.0228135.4314135.0901134.7875134.4496134.1116133.9525134.3712134.7898135.0493135.0518  
134.7856135.1275135.4310134.9666134.8830135.0076135.2665135.4114135.3590135.2476135.2503135.6882136.1261137.2980137.5879137.8778  
139.5835141.5433  
143.9341143.1571142.0769140.9966139.9164139.8865142.8561141.6854140.5147139.3441138.1733137.0027135.8320134.5885134.9519135.3226  
134.9578134.3406133.9706134.2834134.6131134.6663134.0750133.5015133.1951132.8588132.8285132.9582133.4593133.8780134.1020133.9310  
133.5863133.9618134.2103133.6170133.1983133.3838133.6428133.8585133.7653133.6539133.7006134.1386134.5956135.0707135.5654136.0600  
137.0769139.0778  
143.0606142.1190141.0387139.9585138.8783137.7981137.8107136.6400135.7636135.0798134.3960133.7122133.0285132.9720133.3427133.7090  
133.6431133.0258132.7641133.0642133.3824133.3099132.7186132.1272131.8137131.7834131.7531131.9581132.4955132.9662133.1546132.5167  
132.3871132.7961132.8607132.2674131.7200131.8979132.1794132.4275132.3508132.2635132.4550132.9704133.4853133.7636134.2290134.6981  
134.8006136.7036

142.1611141.0808140.0006138.9204137.8402136.4539135.3863134.7025134.0187133.3349132.6512131.9674131.2790131.3608131.7335132.0635  
132.1184131.7110131.5577131.8578132.1579131.9528131.3524130.7519130.6035130.7079130.6777130.9580131.4954132.0328131.8294131.1024  
131.1878131.6065131.5111131.0260130.6356130.6809130.9623131.1511131.1019131.0146131.3340131.8600132.3749132.5822132.8927133.2911  
133.3936134.3294  
141.1230140.0427138.9625137.8823136.3117134.5346133.3607132.9577132.2739131.5901130.9063130.2213129.5292129.7489130.1242130.4180  
130.4729130.3963130.3512130.6413130.3422130.5756129.9751129.3747129.3457129.5014129.6022129.9579130.3408130.5507130.2995129.6881  
129.9886130.3735130.3320129.8932129.5708129.4902129.7452129.8747129.8529129.7656130.2130130.7481131.1994131.4008131.6022131.8841  
131.9866132.0891  
140.0848139.0046137.9244136.1694134.3923132.6152131.3186131.0616130.5290129.8452129.1615128.4715127.7793128.1370128.5130128.7726  
128.8274128.8759128.6359128.3369128.0378128.3827128.5979127.9974128.0880128.2437127.9633128.3718128.5816128.7349128.4816128.2497  
128.6544129.0185129.0707128.7604128.5060128.4254128.5281128.5982128.5865128.5570129.0920129.6271130.0135130.2097130.4059130.7442  
130.9487131.1522  
139.0467137.8042136.0271134.2500132.4729130.6958129.2765129.0195128.7625128.1004127.4137126.7216126.1491126.3769126.5714126.7726  
126.7174126.6621126.3526126.0325125.7335126.1557126.6953126.6745126.6167125.9451125.9008126.6126126.8225126.9176126.6636126.8215  
127.2995127.5759127.6257127.6277127.4412127.3606127.3110127.3218127.3101127.4360127.9158128.3808128.7892128.9861129.1823129.8089  
130.0605130.2618  
137.6620135.8849134.1078132.3306130.5535128.7764127.2344126.9774126.7204126.3555125.5997124.7740124.0358123.9625124.1570124.3821  
124.5036124.4483124.1101123.7501123.4291123.9287124.3743124.5984123.9269123.2553123.9557124.8534125.0276125.1004124.8457125.3933  
125.9445126.1309126.1781126.1002126.3494126.2653126.1663126.1018126.0908126.2091126.6378127.1028127.4923127.7624128.0132128.7039  
129.1723129.3715  
135.7426133.9655132.1884130.4112128.6341126.8570125.1923124.9353124.6783124.1051123.5096122.6839121.9932121.5480121.7425121.9737  
122.2203122.2277121.8677121.5076120.9438121.2372121.5432121.7146121.2371120.8570122.0105123.0942123.2103123.2831123.4018123.9651  
124.3816124.5131124.4352124.4978125.2386125.1544125.0323124.9009124.8899125.0693125.3598125.8171126.1954126.5387126.9082127.5990  
128.2841128.4811  
133.8232132.0461130.2690128.4919126.7147124.9376123.1605122.8932122.4847121.6561121.3432120.5938119.9506119.4827119.3281119.5652  
119.8118119.9470119.1608118.3747118.1484118.4061118.6996118.8127118.5473118.9118120.0653120.6555121.0160121.1339121.5436121.8209  
122.1234122.7701122.6922122.9866123.9462124.0435123.8984123.7215123.6890123.9295124.1777124.5202124.8986125.2769125.8033126.4414  
127.0622127.3006  
131.6316129.9816128.3315126.5725124.7954123.0182121.2411120.8511119.9758119.2071118.8943118.5037117.9081117.4402116.9661116.9426  
116.9786116.7117115.9663115.1801115.3530115.5750115.7976115.9107115.8576116.5095116.7038117.2211118.0698118.1877119.0965119.5374  
119.9327120.6244120.9492121.4755122.4350122.9327122.7644122.5875122.5415122.8388123.3027123.4870123.8628124.2386124.5102125.1310  
125.7040126.0474  
129.2143127.7167126.0667124.4167122.7667121.0989119.3217118.4587117.4670116.7582116.4653116.2682115.6138115.0420114.3551113.9158  
113.9518113.4531112.7718112.3476112.5577112.7678112.7459112.7197112.7038112.7980112.9923113.7868115.1236115.3591116.3269117.2540  
117.7421118.4338119.1254119.9643120.8689121.7172121.4574121.1976121.7373122.2653122.7292122.7786122.9400123.3089123.3954123.8206  
124.3419124.7069  
126.7473125.2646123.7818122.1518120.5018118.8518117.2018116.0654115.0835114.6439114.4467114.1147113.1542112.5461111.7171110.8890  
110.7888110.1945109.5773109.5522109.4440109.2865109.2016109.1856109.1696109.2316109.2935110.3524111.6920112.5895113.5527114.1602  
114.9682115.4666115.9650117.6493118.5286119.3976119.7925119.5327120.4693121.6917122.1556122.0923122.0173122.3246122.4111122.5101  
122.9798123.3448  
124.2804122.7976121.3149119.8321118.2370116.5870114.9990113.7444112.7625112.5948112.4281111.8477110.8872110.0502109.0792108.0732  
107.5302106.9250106.3300106.0909105.9711105.7289105.6061105.6513105.6355105.6974105.5905106.3686107.8059108.9630109.5704110.1779  
111.4407112.1486112.7697114.7241116.1883117.0515117.8988117.8677119.2014120.8103121.5402121.4060121.2717121.3404121.4664121.6488

121.8803122.2429

121.9300120.3307118.8479117.3651115.8824114.3221112.8157111.5166110.5869110.5213110.4095109.5806108.5418107.3551106.2656105.2424

104.2243103.6148103.0588102.6179102.4982102.1712102.0106102.0558102.0856101.9562101.9121102.2481103.6855104.7994105.5881106.1955

107.5533108.8306109.6472111.6017113.5561114.7055115.5527116.3245117.9334119.4607120.7169120.4569120.1968120.6509120.8333121.0118

121.0833121.4459

119.6577117.8637116.3809114.8982113.4154111.9327110.7016109.3943108.4395108.3639108.1852106.9657105.8072104.5864103.3490102.3014

101.1291100.3045 99.7876 99.3106 98.9667 98.6136 98.4151 98.3662 98.2467 98.1925 98.2423 98.5553 99.5651100.6131101.5444102.2449

103.6658105.0867106.5248107.9552109.2783111.9205112.7833114.0001115.7386117.2468118.6808119.1274118.8673119.7330120.2002120.3440

120.3707120.6488

117.3855115.4682113.9140112.4312110.9485109.6411108.7684107.4610106.2755105.9755105.6989104.3192103.0726101.8178100.5153 99.3436

98.1713 97.0002 96.5701 96.1466 95.4792 95.1064 94.6487 94.4726 94.3871 94.4159 94.5724 94.8855 95.4447 96.4267 97.3581 98.3538

99.6853101.0169102.4153103.4099104.7330107.7453109.9634111.4519113.5247115.0330116.4313117.7952117.6187118.6698119.5671119.6763

119.7030119.8518

115.1133113.1959111.4470109.9643108.4815107.4667106.7077105.5278104.3732103.5871103.2126101.8329100.4963 99.2377 98.0017 96.8223

95.7263 94.5216 93.5029 93.0794 92.0489 91.6603 90.9214 90.5790 90.5276 90.6697 90.4178 90.8032 91.2014 91.8282 92.6203 93.6926

95.4831 96.8147 98.5039 99.4245100.3388103.3487106.6953108.9036111.0343112.8180114.1819115.5458116.5556117.6067118.6578119.0086

119.0353119.0619

112.8410110.9237109.0064107.4973106.3034105.2924104.5647103.5945102.4710101.3914100.7263 99.4230 98.2689 96.8940 95.6581 94.4767

93.3564 92.0395 90.4357 89.8631 88.7671 88.1846 87.3203 86.6853 86.7204 87.1586 85.8997 86.2852 86.7186 87.0370 87.7422 88.9103

90.8788 92.7286 94.4252 95.5513 96.6614 98.9379102.2860105.1860107.6849110.6414112.0423113.4431115.0913116.0998117.1072117.8949

117.9396118.0678

110.5688108.6515106.7342105.1400104.1291103.1196102.4218101.6613100.5687 99.4891 98.3496 97.1956 96.0416 94.6532 93.3144 92.1349

90.9959 89.5574 87.8840 86.5813 85.4853 84.5835 83.7192 82.8668 83.2651 83.2155 81.3816 81.7910 82.2357 82.5790 82.8641 84.1280

85.8740 88.3658 90.1514 91.8739 93.0469 94.8714 97.8539100.9791103.4780107.7545110.0129111.4137113.1868114.5429115.5585116.6557

116.8201117.0806

108.2966106.3793105.2817103.7489102.8133101.7219100.9163100.0252 99.0122 97.9885 96.5961 95.0942 93.8111 92.4124 91.0137 89.8423

88.9738 87.5979 85.9815 84.1531 82.9589 81.1779 80.3459 79.7382 79.8097 79.2723 77.3552 77.3300 77.7529 78.1212 78.2682 79.0080

80.5919 83.5281 85.7459 87.6010 89.4328 91.1580 93.4101 96.6053 99.8969104.8588107.7569109.3978111.2823112.9860114.0196115.1167

115.7006116.0933

106.0262105.3802105.3064102.5666101.5934100.3724 99.5669 98.5432 97.5267 96.3083 94.9175 93.4156 91.9451 90.5002 89.1360 88.0567

87.0964 85.7587 84.0530 81.8599 80.6431 78.5001 76.9931 76.6428 76.5140 75.3767 73.5459 73.1362 73.4180 72.9772 73.0440 73.9586

75.3097 78.6158 81.3492 83.0729 84.6042 86.2927 89.5413 92.4907 97.0485101.9631104.8611107.4933109.3779111.2625112.4806113.5777

114.5811115.1060

104.1603104.1037103.4734101.6654100.2443 99.0229 98.0917 97.0611 95.9584 94.6281 93.2390 91.8803 90.3333 88.7340 87.4070 86.2776

85.1700 83.8874 82.0369 79.8439 78.1087 75.9049 73.7598 73.4961 73.3291 71.5408 69.7366 68.9312 68.4330 67.9648 67.8197 68.9772

69.8395 73.1448 76.6039 78.2585 79.7919 81.4274 85.2577 88.6811 94.0733 99.1037102.5447105.6639107.6810109.5087110.8285111.9245

113.0206113.9223

Ejemplo de archivo para malla A1 "INDAT.DAT"

&FNAMES

FNAME1 = 'refdat.dat',  
FNAME2 = 'outdat.dat',  
FNAME3 = 'subdat.dat',  
FNAME4 = 'wave.dat',  
FNAME5 = 'owave.dat',  
FNAME6 = 'surface.dat',  
FNAME7 = 'bottomu.dat',  
FNAME8 = 'angle.dat',  
FNAME9 = '',  
FNAME10 = 'refdif1.log',  
FNAME11 = 'height.dat',  
FNAME12 = 'sxx.dat',  
FNAME13 = 'sxy.dat',  
FNAME14 = 'syy.dat',  
FNAME15 = 'depth.dat'/

&INGRID

MR = 50,  
NR = 50,  
IU = 1,  
NTYPE = 1,  
ICUR = 0,  
IBC = 1,  
DXR = 579.,  
DYR = 942.,  
DT = 1000.,  
ISPACE = 0,  
ND = 66,  
IFF = 1 0 0,  
ISP = 0,  
IINPUT = 1,  
IOUTPUT = 1/

&WAVES1A

IWAVE = 1,  
NFREQS = 1/

&WAVES1B

FREQS = 14.,  
TIDE = 0.,  
NWAVS = 1,  
AMP = 1.25,  
DIR = 0./



Ejemplo de archivo "PARAM.H"

```
parameter(ixr=200,iyr=200,ix=200,iy=1000,ncomp=1)
```

## ANEXO II.

Propagación de los rayos de olas de dirección Sur, Oeste y Suroeste